

# 視覚的ファントム現象の解析 -視覚的補間の特性と機能-

著者	行場 次朗
学位授与機関	Tohoku University
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/54161">http://hdl.handle.net/10097/54161</a>



# 視覚的ファントム現象の解析

— 視覚的補間の特性と機能 —

行 場 次 朗





# 視覚的ファントム現象の解析

— 視覚的補間の特性と機能 —

## 1. 視覚的補間について

- 1-1 視覚的補間の定義と本稿の根本的立場
- 1-2 視覚的補間現象の分類
  - 1-2-1 空間的補間に関する従来の研究
  - 1-2-2 空間的補間と時間的補間
  - 1-2-3 感性的補間と非感性的補間
- 1-3 視覚的補間をどう捉えるべきかの考え方

## 2. 視覚的ファントム

— 視覚的補間現象の典型例 —

- 2-1 Panumの法則
- 2-2 静止ファントム
- 2-3 フリッカー
- 2-4 停止ファントム
  - 2-4-1 基本的手法
  - 2-4-2 装置の基本構造
  - 2-4-3 観察装置の完成
- 2-5 Houghの法則と視覚的ファントムの現象

行 場 次 朗



# 視覚的ファントム現象の解析

## ——視覚的補間の特性と機能——

### 目次

#### 論文要旨 ----- ix

#### 1 視覚的補間について

1-1 視覚的補間の定義と本論の基本的枠組み -----	1
1-2 視覚的補間現象の分類 -----	3
1-2-1 視覚的補間に関する従来の研究	
1-2-2 空間的補間と時間的補間	
1-2-3 感性的補間と非感性的補間	
1-3 視覚的補間をとらえる二通りの考え方 -----	7

#### 2 視覚的ファントム

#### ——視覚的補間現象の典型例——

2-1 Rosenbach 効果 -----	11
2-2 運動ファントム -----	14
2-3 フリッカーファントム -----	15
2-4 静止ファントム -----	16
2-4-1 基本的手法	
2-4-2 装置の基本構成	
2-4-3 現象観察：実験 I	
2-5 Rosenbach 効果と視覚的ファントムの関連 -----	21



### 3 視覚的ファントムの諸特性

3-1 空間周波数特性	25
3-1-1 ファントムの臨界空間周波数：実験 II	
3-1-1-a 方法	
3-1-1-b 結果および考察	
3-1-2 空間周波数同調曲線：実験 III	
3-1-2-a 方法	
3-1-2-b 結果および考察	
3-1-3 複合縞によるファントムの見え：実験 IV	
3-1-3-a 方法	
3-1-3-b 結果および考察	
3-2 時間周波数特性	32
3-3 立ち上り特性：実験 V	34
3-3-1 方法	
3-3-2 結果および考察	
3-4 最適帯輝度	35
3-4-1 帯幅をパラメータとした場合：実験 VI	
3-4-1-a 方法	
3-4-1-b 結果および考察	
3-4-2 誘導縞のコントラストをパラメータとした場合：実験 VII	
3-4-2-a 方法	
3-4-2-b 結果および考察	
3-4-3 矩形波誘導縞によるファントムの最適帯輝度：実験 VIII	
3-4-3-a 方法	
3-4-3-b 結果および考察	
3-5 コントラスト特性と帯幅の影響	46
3-6 輝度特性：実験 IX	47
3-6-1 方法	
3-6-2 結果および考察	
3-7 色度特性：実験 X	50
3-7-1 方法	
3-7-2 結果および考察	

3-8 方位特性：実験 XI	55
3-8-1 方法	
3-8-2 結果および考察	

### 4 空間周波数処理機構との対応づけ

4-1 視覚チャンネルの特性との関連	59
4-1-1 一過型チャンネルと持続型チャンネルの特性	
4-1-2 一過型チャンネルの特性との関連	
4-2 空間周波数検出器の特性との関連	63
4-2-1 縦布置における空間周波数検出器の特性	
4-2-2 ファントムの特性との対応	

### 5 縞誘導効果との相違

5-1 縞誘導効果の特性	67
5-2 両現象の連続性	68
5-3 両現象の相違点	69
5-3-1 誘導縞の平均輝度の違い	
5-3-2 帯幅の影響の違い	
5-3-3 あたため期間の必要性の違い	
5-3-4 知覚的安定性の違い	
5-3-5 誘導された縞の見え方の違い	
5-3-6 誘導現象の可塑性の違い	
5-4 縞誘導効果との関連についての結論	72

### 6 関連する視覚的補間現象

6-1 重なる知覚との関連性	73
6-1-1 「地」の知覚の特性	
6-1-1-a 空間・時間周波数特性	
6-1-1-b コントラストおよび色度特性	



6-1-1-c	方位特性	
6-1-1-d	ファントムと共通性	
6-1-2	二重表現	
6-1-3	表象的神経活動	
6-2	感性的補間と非感性的補間の差異	83
6-2-1	奥行き関係の制約	
6-2-2	T型接点の手掛かり	
6-3	主観的輪郭との関連	89
6-3-1	両現象の共通点	
6-3-2	両現象の相違点	
6-3-3	両現象の関連のまとめ	
6-4	透明視現象との関連	94
6-5	ポグENDORF錯視との関連	97

## 7 視覚的補間の生理学的基盤

7-1	大細胞系の特性：小細胞系との対比から	101
7-2	大細胞系の機能低下時における視覚的補間	105
7-3	連結機能の一側面としての視覚的補間	106
7-4	一過型チャンネルおよび持続型チャンネルとの関連	107

## 8 視覚的ファントムの特性と生起過程のまとめ

8-1	視覚的ファントムの特性の要約	109
8-2	視覚的補間現象としての特異性	110
8-3	ファントムの生起過程モデル	111
8-3-1	基本過程	
8-3-2	促進要因の関与	
8-3-3	阻害要因の関与	

## 9 視覚的補間研究の視覚論上の意義

9-1	3つの視覚論	115
9-1-1	Helmholtz 的見解	
9-1-2	Gibson 的見解	
9-1-3	視覚計算理論の見解	
9-2	視覚的計算による補間と知識にもとづく補間	118
9-3	情報圧縮処理としての視覚的補間	120
9-4	系統発生的に古い機能としての視覚的補間	121
9-5	前注意的処理過程としての視覚的補間	121
9-6	視覚情報処理心理学の今日的意義	122

## 謝 辞

## 引用文献



## 視覚的ファントム現象の解析

### — 視覚的補間の特性と機能 —

#### 要 旨

本論文の主要な目的は、視覚的補間現象 (visual interpolation phenomena) の典型例として視覚的ファントム (visual phantom) を取り上げ、その特性と生起メカニズムの詳細な分析を行うことである。そして、得られた知見を視覚情報処理心理学の観点から考察することにより、視覚的補間の特性および機能的・理論的意義について理解を深めることである。

第1章「視覚的補間について」では、はじめに視覚的補間の定義を行い、本論の基本的枠組みについて論述した。すなわち、対応する刺激情報が一部欠損しているにもかかわらず、それを補い、欠損がない場合と同等の知覚内容を生じる視覚系のはたらきを一括して視覚的補間とよぶことにし、それを明示する現象をリストアップした(行場・丸山, 1978)。

次に、視覚的補間に関する従来の知見を概観し、リストアップされた現象を見通しのよい分類基準を用いて整理した。一つの基準は、対応する刺激情報の欠損が空間的(あるいは永続的)なものか、または時間的(あるいは一時的)なものかという基準であり、それぞれ空間的補間 (spatial interpolation) と時間的補間 (temporal interpolation) に分類された。もう一つは、補間された部分が実際に見えるか、あるいは



見えなくともそれが実在していると知覚されるかという基準であり、それぞれ感性的補間 (modal interpolation) と非感性的補間 (amodal interpolation) に分類された。

これらの分類結果をもとに、視覚的補間の生起メカニズムを追求する際の指針となる二通りの考え方を示した。一つは、一部欠損のある刺激情報を視覚系が処理するとき、欠損を検出することなく、通常の特徴抽出を行うと考えられる場合 (ケース1) であり、もう一つは、情報欠損のあることを検出した後、その欠損を穴埋めするように補間機構がさらにはたらくと考えられる場合 (ケース2) である (行場、1986 参照)。以下の章では、特に視覚的ファントムについて、どちらの考え方が妥当かを詳細に検討した。

第2章「視覚的ファントムー視覚的補間現象の典型例ー」では、視覚的ファントムに関するこれまでの研究を概観し、現象の正確な記述を行った。視覚的ファントムとは、縞刺激の中央部分を不透明な帯で遮蔽し、薄暗い照明の下で観察すると、遮蔽部分にも縞が淡く誘導され、上下の縞が連結して知覚される現象であり、第1章で行った分類基準に従えば、空間的補間であり、かつ感性的補間に所属する。

視覚的ファントムは、誘導縞が運動や明滅する条件でもっぱら報告されてきたが、Gyoba (1983) は、平均輝度の低い誘導縞を暗室状態で観察するなら、静止条件でも観察されることを見だし、静止ファントム (stationary phantom) と名づけた。静止ファントム (以下、ファントム) の発見は、Rosenbach 効果や縞誘導効果などの類似現象との関連性を考察することを容易にするものである。また、縞刺激の導入により、フーリエ技法を応用した効率のよい線形システム分析法が適用できると

ともに、近年になって解明の進んだ視覚系の空間周波数処理機構との対応件をとりやすい利点を生み出したといえる。

第3章「視覚的ファントムの諸特性」は、線形システム分析法を援用した心理物理実験データにもとづき、視覚的ファントムの諸特性を詳細に分析したものである。その結果、以下の点が明らかにされた。

ファントムは、誘導縞の空間周波数が低い場合 (3 ~ 6 c/deg 程度以下) に出現する現象である。誘導縞の時間周波数は高いほうが生起しやすい。ファントムが知覚されるまでには、ある一定の時間 (あたため期間、incubation period) が必要である。帯の輝度が誘導縞の平均輝度レベルにあるとき、ファントムは知覚されず、逆相の縞が誘導される。誘導縞にわずかなコントラストがあればファントムは知覚され、コントラストの増加による効果はすぐに飽和する。薄暮視あるいは暗所視レベルの照明状態で生起する現象である。等輝度・色度差条件における誘導縞では、ファントムは出現しない。垂直方位によく出現し、斜め方位には発生しにくい。

第4章「空間周波数処理機構との対応づけ」では、前章で分析した視覚ファントムの特性と、縞刺激を用いた視覚系の応答分析から明らかにされた2つの視覚チャンネル、すなわち一過型チャンネルと持続型チャンネルの特性との対応関係が考察された。それによると、視覚的ファントムの空間および時間周波数特性は一過型チャンネルのそれと類似しているのに、立ち上がり特性は持続型チャンネルの積分的応答に近く、両者の特性を合わせもつユニークな現象であることが明らかにされた。

また、ファントムと類似した刺激布置を用いて分析された空間周波数



検出器の特性との関連も検討された。その結果、ファントムの臨界空間周波数のデータは、推定された受容野のサイズとよく対応することがわかった。しかし、ファントムを生起する誘導縞の多くは、分析された空間周波数検出器の特性からすると、もっぱら抑制効果を生じるはずの高いコントラストをもっているため、その特性のみからファントム現象を説明することは困難である。

第5章「縞誘導効果との相違」は、ファントムの類似現象である縞誘導効果との関連を詳細に検討したものである。Sakurai & Gyoba (1985) は、帯輝度が誘導縞の明暗ピーク付近にあるときにはファントムが、一方、平均輝度付近にあるときには縞誘導効果が生じることを示し、両者が連続線上に並ぶことを示唆した。しかし、ファントムが薄暮視、あるいは暗所視状態で生起する現象であるのに対し、縞誘導効果が明所視レベルの現象であるなどの相違点が明らかになり（行場、1991）、両現象の背後には別個のメカニズムを想定したほうが妥当であると結論された。

第6章「関連する視覚的補間現象」は、ファントムをより広いコンテクストで理解するため、第1章で分類整理した種々の視覚的補間現象のうち、特に空間的補間に含まれるものとの関連性を追求したものである。

その中で特に重要なのは、重なる知覚との関連である。重なる知覚では、二重表現（遮蔽される領域が、実際に見えていなくても、遮蔽する領域の背後まで広がって見える印象）が知覚される。二重表現が最も端的にあらわれるのは「地」の知覚であるが、「地」の知覚にあらわれる空間・時間周波数、色度、および方位特性などがファントムのそれらとよく一致することがみいだされた（行場、1991）。また、ファント

ムおよび「地」の知覚でも、縞刺激が実際には存在しない領域にも縞に対する順応効果があることが確かめられた（Gyoba, 1979）。

ファントムと重なる知覚の違いは、前者が感性的補間に、後者が非感性的補間に所属することであるが、上述した考察からすると、両者の差異はわずかであり、背後には共通のメカニズムがあるのではとの推測が成り立つ。差異を作り出す決定因として注目したのは、視覚環境のもつ強い構造的な起因する制約である。その一つが奥行き関係の制約であり、ある領域が見えるためにはそれが他の領域に隠蔽されることなく、最前面に位置づけられなくてはならない。この制約に従った視覚処理が可能になるかどうかで見える補間になるか、見えない補間になるかがきまると考えられる。

ファントムの刺激布置において、奥行きの手掛かりになるのは誘導縞の稜と帯の間に存在するT型接点であるが、これが知覚されている間は帯が前面に位置づけられ、非感性的補間が生じている。ところが、帯の輝度レベルによっては、黒縞か白縞いずれか一方の稜におけるT型接点はエッジの輝度差が小さく、感受されにくくなる可能性がある。このとき奥行き関係の制約が解除され、感性的補間であるファントムの発生につながると考えられる。ファントムは非感性的補間と感性的補間の橋渡しをするユニークな現象であることを指摘した。

次に、主観的輪郭との関連を検討した。この現象も感性的補間に属し、奥行き関係の制約をみたして成立しているが、空間周波数偏好性や輝度特性、知覚的安定性などにファントムとの相違がみいだされた。ファントムが端点の検出がなされないときに生じる現象であるのに対し、主観的輪郭は端点を検出してからなされる補間である可能性が示された。

透明視現象との関連では、それがファントムの促進要因、あるいは阻



害要因として働くと考察された。ファントムが知覚されるとき、補間された縞には透明感がともなうことがあるが、帯が平均輝度レベルにあるとき、そのような透明感はなく知覚されない。これは、縞誘導効果により逆相の縞が誘導されているとすると、周辺領域の明るさ関係から算出される透明視係数はマイナスになり、透明視の成立に必要な条件が満たされていないことによると考察された (Sakurai & Gyoba, 1985)。

Poggendorff 錯視とファントムとの関連では、両現象とも視覚的補間には異方性があり、垂直あるいは水平方位に強力にはたらくが、斜め方位にははたらしにくい傾向があることが強調された (行場, 1992)。

第7章「視覚的補間の生理学的基盤」では、ファントムも含めて、広く視覚的補間の生理学的基盤が考察された。注目したのは、最近、霊長類の視覚系の下位システムとしてその特性が明らかにされてきた大細胞系である。大細胞系のニューロンの解像度は低い、応答は迅速で、刺激の輝度やコントラストがわずかであっても感度よく応答する。また、刺激の末端に弁別的に応答するエンドストップ特性を示さないものが多い。エンドストップ特性をもたないことは、刺激の端点を検出しないので、同じ方位をもつ刺激を連結して処理する可能性が考えられる。端点などの細かな形状の分析は、解像度の高い小細胞系で行われるとされる。

視覚的補間の担い手として大細胞系が候補にあげられたのは、そのはたらしが低下する等輝度・色度差条件の刺激を用いると、ファントムをはじめ、「地」の知覚、主観的輪郭などが生起困難になることがみいだされたからである。大細胞系は運動視や奥行視と密接な関連があり、視覚情報から共通成分を抽出して連結する機能を幅広く担当していることが知られている。視覚的補間もこの普遍的な連結機能の一側面であると

考えられる。

第8章「視覚的ファントムの特性と生起過程のまとめ」は、ファントムの特性と、補間現象としての特質を要約し、その生起過程について大細胞系のはたらしをベースにしたモデルを提出したものである。低空間周波数で、低輝度の縞刺激が提示されたとすると、大細胞系が活性化し、相対的に小細胞系の活動が低下するはずである。大細胞系のニューロンはエンドストップ特性をもたないものが多いので、帯で遮蔽される誘導縞の端点 (T型接点) は検出されにくくなる。そのとき、縞が帯の前面に位置づけられる可能性が生じ、奥行き関係の制約がとけることにより感性的補間に移行し、共通成分を連結する大細胞系のはたらしがあらわれる。奥行き反転に要する時間はあたため期間に対応すると考えられる。

大細胞系の応答は一過的であり、特に持続的注視をしていると活動が停滞し、逆に小細胞系のはたらしが活発になると予想される。すると、端点が検出され、誘導縞は帯の背後に位置づけられるので、奥行き関係の制約により非感性的補間に復帰し、ファントムは消失する。これがファントムの知覚に動揺性が生じる理由であろう。

上述したモデルにより、高い時間周波数の刺激など、大細胞系のはたらしを活発にするものはファントムの促進要因に、逆に、高い空間周波数や高輝度の刺激など、小細胞系を活性化するのは阻害要因になることが示された。

最終章にあたる第9章「視覚的補間研究の視覚論上の意義」では、これまで行った考察をより高い視座から眺望し、その位置を確認するため、視覚論上における視覚的補間研究の意義を、本論で採用した視覚情報処



理心理学の方法論的意義とともに追求した。

感覚情報からの飛躍を示す視覚的補間現象は、知識や予測が先行して外界の解釈が進行するとするトップダウン的見解にそって受けとられやすい。しかし、本論でなされた考察結果からすると、視覚的補間は、空間周波数、時間周波数、方位などの情報と、視覚環境がもつ奥行き関係の制約などを利用して領域を連結し、外界の3次元構造を復元する上向きの推計を行う過程のあらわれといえる。

ファントムの生起過程モデルで示した大細胞系のはたらきを基本とする考え方は、視覚的補間をとらえる二通りの考え方との関連から考察すると、明らかにケース1に近い。欠損の分析的な検出を行うのではなく、冗長性に富む共通成分があれば特徴抽出と一体化された連結機能がはたらくことにより補間がなされ、できるだけ効率のよい情報圧縮処理がなされているのである。

視野内の情報を広い範囲にわたって素早く、注意をとまわずに自動的に処理するモードは前注意的処理とよばれている。視覚的補間も含めて前注意的処理の大半は、系統発生的に古い機能といえる。注意や意識をともなった分析的処理は、より高等な生体にそなわった新しい視覚機能といえるが、そのような処理も、前注意的処理によりあらかじめ外界の構造がおおざっぱに抽出されているおかげで、効率よく進行することができるのであろう。

視覚情報処理心理学の役割は、日常、経験する知覚世界に密着し、現象の精密な記述や機能の心理物理学的測定、過程の同定実験などを行い、そこから得られた知見を共通性の高い情報科学用語を用いて表現し、視覚生理学やコンピュータビジョンの研究者と共に考察してゆくことにあると考えられる。

## 視覚的ファントム現象の解析

### — 視覚的補間の特性と機能 —

### 本 論

### 行 場 次 朗



## 1 視覚的補間について

本論文の主要な目的は、視覚的補間現象 (visual interpolation phenomena) の典型例として視覚的ファントム (visual phantom) を取り上げ、詳細な分析を行うことである。そして、得られた知見を視覚情報処理心理学の観点から考察することにより、視覚的補間の特性および機能的・理論的意義について理解を深めることである。

第1章では、はじめに視覚的補間の定義を行い、本論の基本的枠組みについてのべる。次に、視覚的補間に関する従来の知見を概観し、リストアップされた現象を見通しのよい分類基準を用いて整理し、後の議論の準備を行う。

### 1-1 視覚的補間の定義と本論の基本的枠組み

対応する刺激情報が一部欠損しているにもかかわらず、それを補い、欠損がない場合と同等の知覚内容を生じる視覚系のはたらきを一括して、視覚的補間 (visual interpolation) とよぶことにする。

わかりやすい例をあげると、図1-1によく知られた指の手品が描いたものである。親指には人さし指に隠されて見えない部分があるが、背後で連結しているとみてしまう。Gregory (1970) は「見ることは賭けである」といったが、その「賭け」がここでは裏目にでたのである。この例が示すように、私たちの視覚系では見えている部分の情報から、見



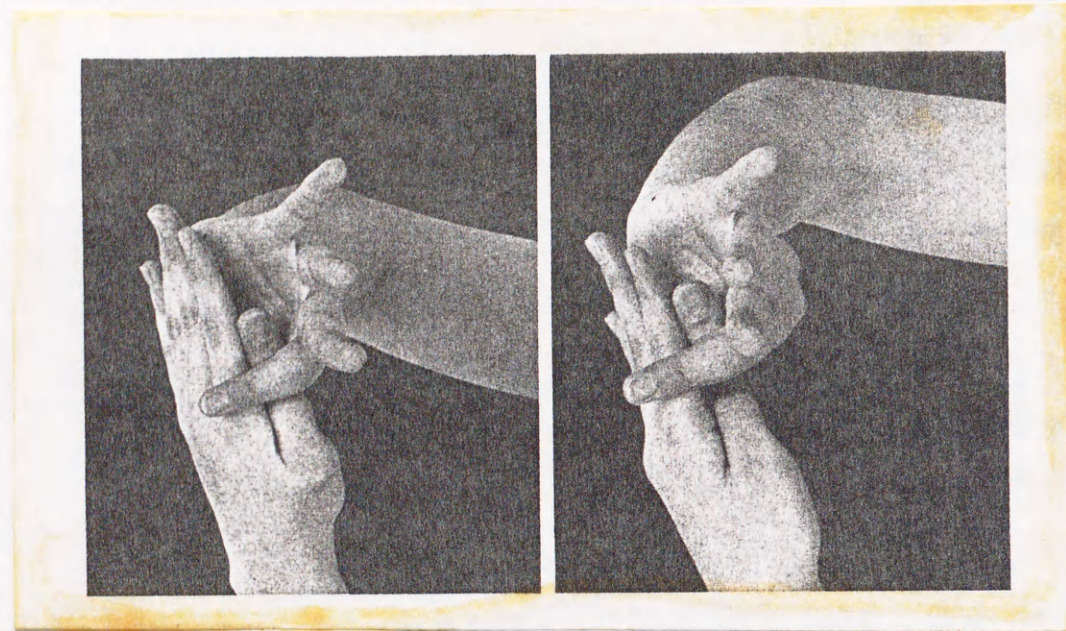


図 1-1 視覚的補間のはたらきの裏をかく手品。(写真は野口・増田，1980 より)

えない部分を補間しようとするはたらきが絶えず行われている（行場，1991 参照）。

これまでの研究においても、「補充 (filling-in)」、「完結化 (completion)」などという用語をもちいて、外界を知覚する過程における視覚的補間の重要性が指摘されてきた（野口，1977；行場・丸山，1978 参照）。Miller (1967) によれば、知覚の本質は「感覚情報からの飛躍」にあるとされるが、この飛躍を具体的に示す好例が視覚的補間には数多く含まれている。したがって、この種の問題を取り上げることが、すぐさま視覚論の本質に関与する重要な課題と考えられる。

本論では、視覚的補間現象の典型例として視覚的ファントムを取り上げ、詳細な分析を行うことにする。そして、そこで得られた知見から、視覚的補間に関する一般的理解を深めることにする。

本論で示されるアプローチの特色は、視覚情報処理心理学の観点を採用したことにある。これは視覚現象の解明に、情報科学の領域で洗練されてきた概念や手法を積極的に取り入れ、得られた知見を視覚生理学やコンピュータビジョン研究とのインターフェースをとりながら、総合的に考察してゆくものである（詳しくは2-4-1および9-6でのべる）。

## 1-2 視覚的補間現象の分類

次に、視覚的補間の存在をうきぼりにする現象を、従来の研究にもとづきリストアップし、整理・分類してみる。なお、本論は視覚的補間現象のうち、おもに視覚的ファントムについて詳細な分析を行うことを目的にしているので、リストアップされた諸現象についての一般的な紹介



は行場・丸山（1978）に委ねることにする。新たな解説は、視覚的ファントムとの関連から、必要に応じて行うことにする。

#### 1-2-1 視覚的補間に関する従来の研究

視覚的補間に注目し、最初に現象を整理したのは Michotte (1963) であろう。彼は、対応する感覚をとまなわず、刺激布置全体によって決定される知覚を非感性的知覚(amodal perception, perception without sensation) とよび、その例として、盲点の補充、スクリーニング効果、トンネル効果などをあげている。Michotte (1963) は、これらの知覚をゲシュタルトの体制化法則の特殊なあらわれとみていた。

Maruyama & Iwasaki (1973) は、「対象、あるいは事変(event)の一部が遮蔽されているときに、全体を一部欠損とは受け取らず、一部遮蔽された矛盾のない全体として知覚するはたらき」を「見越し知覚(prospective perception)」と名づけ、この種の知覚がもつフィードフォワード特性に注目した。さらに、丸山は、隔てを越してみる事態を「空間的見越し知覚」、将来を見通す事態を「時間的見越し知覚」とに分け、前者の例として、重なる知覚、Poggendorff 錯視を、後者の例として、トンネル効果、対象の永続性の知覚などをあげた。

一方、野口(1977)は、外部刺激が欠けている際にも形態が知覚される場合を「知覚的補充」とよび、さらに補充される部分が実際に目に見えるかどうか注目して「見える補充」と「見えない補充」に分けた。前者の例としては Rosenbach 効果を、後者の例としてはトンネル効果をあげた。また野口は、他にもこれに類するものとして主観的輪郭、透明視、重なる知覚をあげ、知覚の本質的機能は外部刺激のコピーを見

ることではなく、新しいゲシュタルトを創造することにあるとした。

行場・丸山(1978)は、様々な類例で示される視覚的補間現象をできるだけ広く収集して、整理しなおし、情報処理心理学的観点から総合的に考察する試みを行った。その際、共通する様相、あるいは機制がおのずと浮かび上がるような、見通しのよい分類基準をたてる必要性が指摘された。本論では、行場・丸山(1978)にもとづき、以下にのべるような2種類の基準を設定してみる。

#### 1-2-2 空間的補間と時間的補間

対応する刺激情報の欠損といっても、それが空間的(あるいは永続的)な場合と、時間的(あるいは一時的)な場合が考えられる。この基準により、これまでリストアップされた現象を分類してみると表1-1のようになる。

行場・丸山(1978)の指摘にもあるとおり、空間的補間の場合には、奥行きや運動、輪郭線の知覚と密接な関連をもつものが多い。この点については、後に、視覚的ファントムについての詳細な検討を行いながら考察を深める。一方、時間的補間に所属するものは、欠損時間の長さによって、その担い手がアイコニックメモリーから視覚的短期記憶、認知的推論過程に移行する様相が読み取れる。

#### 1-2-3 感性的補間と非感性的補間

野口(1977)の指摘にあるように、視覚的補間において、補間された部分が実際に見える場合と、感覚的には見えないけれども、それが実在



表 1-1 視覚的補間現象の分類 I

A. 空間的補間

視覚的ファントム (Rosenbach 効果)

重なりの知覚 (「地」の知覚)

主観的輪郭

透明視

Poggendorff 錯視 (補間の不成功例)

盲点・暗点の補充

Craik-O'Brien 効果

B. 時間的補間

Parks 効果

仮現運動

トンネル効果

隠蔽の知覚

行場・丸山 (1978) に基づき作成 (一部改変)

していると知覚される場合がある。本論では前者を感性的補間 (modal interpolation)、後者を非感性的補間 (amodal interpolation) とよぶことにする。これを基準にして分類を行ったのが、表 1-2 である。

これをみると、感性的補間に分類される現象は、それぞれぞれが視覚系のハードウェアによる特有の情報符号化過程と密接な関連を持つ可能性が示唆される (行場・丸山、1978 参照)。一方、非感性的補間に属する現象のほうは、どれも基本的には重なりの知覚と密接な関係をもつように思われる。われわれを取り巻く視覚環境では、ある対象が他の対象を隠したり、隠されたりすることが頻繁に起こっている。コンピュータビジョンの分野では、これを「隠れ (occlusion)」とよんでいるが (Winston, 1975)、非感性的補間に含まれる現象は、基本的にこの問題の変形といえる。感性的補間と非感性的補間の違いおよび共通性は、6-2 で詳しく議論する。

1-3 視覚的補間をとらえる二通りの考え方

視覚的補間の背後にあるメカニズムを追求する際にとられる考え方には、基本的に図 1-2 に示すような二通りがあると思われる (行場、1986)。

一つは、一部欠損のある刺激情報を視覚系が処理するとき、欠損を検出することなく、欠損のない情報を処理するのと同じ要領で処理してしまうと考えられるケースである。この場合、視覚情報処理過程において、通常どおりの特徴抽出が行われた結果として見かけ上の補間が生じるのであり、補間機構が明示的に作動しているわけではない。



表 1-2 視覚的補間の分類 II

A. 感性的補間

視覚的ファントム (Rosenbach 効果)

主観的輪郭

透明視

盲点・暗点の補充

Craik-O'Brien 効果

Parks 効果

仮現運動

B. 非感性的補間

重なるの知覚 (「地」の知覚)

Poggendorff (補間の不成功例)

トンネル効果

隠蔽の知覚

行場・丸山 (1978) に基づき作成 (一部改変)

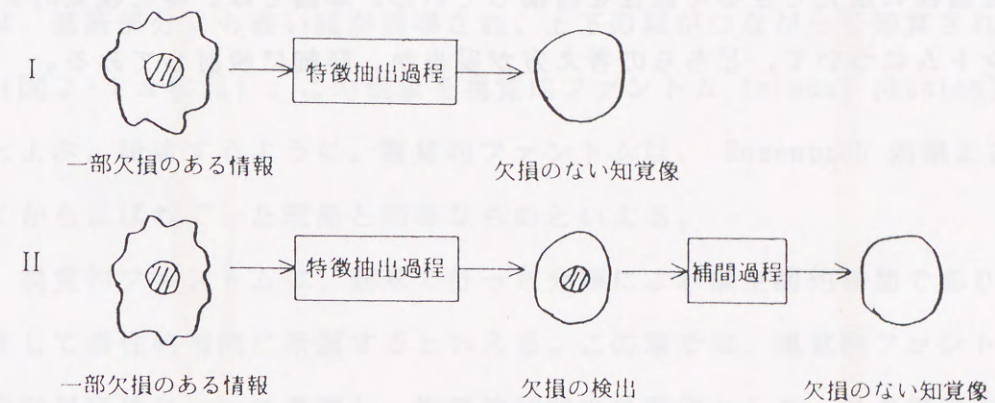


図 1-2 視覚的補間をとらえる二通りの考え方



もう一方の考え方は、視覚系が特徴抽出の結果、刺激の一部に情報欠損のあることを検出した後、その欠損を穴埋めするように補間機構がさらにはたらくと考えられるケースである。

行場・丸山（1978）は、視覚的補間の様相をふくむ現象を総合的に考察した結果、補間を生じるメカニズムは、多くの場合、通常の視覚情報処理過程に還元できる可能性を指摘している。本論では、特に視覚的ファントムについて、どちらの考え方が妥当か、詳細に検討してみる。

## 2 視覚的ファントム --視覚的補間現象の典型例--

縞刺激の中央部分を黒い不透明な帯で遮蔽すると、薄暗い照明の下では、遮蔽部分にも淡い縞が誘導され、上下の縞がつながって知覚される（図2-1 a 参照）。この現象を視覚的ファントム（visual phantom）とよぶ。後述するように、視覚的ファントムは、Rosenbach 効果と古くからよばれていた現象と同等なものといえる。

視覚的ファントムは、前章で行った分類によれば空間的補間であり、そして感性的補間に所属するといえる。この章では、視覚的ファントムの発見経緯について概説し、視覚的補間の典型例として、この現象の特色についてのべる。

### 2-1 Rosenbach 効果

Rosenbach 効果は、Rosenbach（1902）が判断錯誤の研究の中で示したものである。色のついた図形を黒い帯の背後に挿入し、薄暗い照明の下で観察すると、帯で遮蔽されている図形の領域が、あたかも帯が半透明になったかのように、淡い色をともなって知覚される（図2-2 参照）。その図形をゆっくり動かすと、この効果はさらに鮮明になる。角をもつ図形を動かすと、角のとれた湾曲した図形が見えると報告されている。

その後、Metzger（1953）は、Rosenbach 効果をよいゲシュタルトを形成する傾向の強いあらわれとしてとらえ、その過程が知識や期待に依



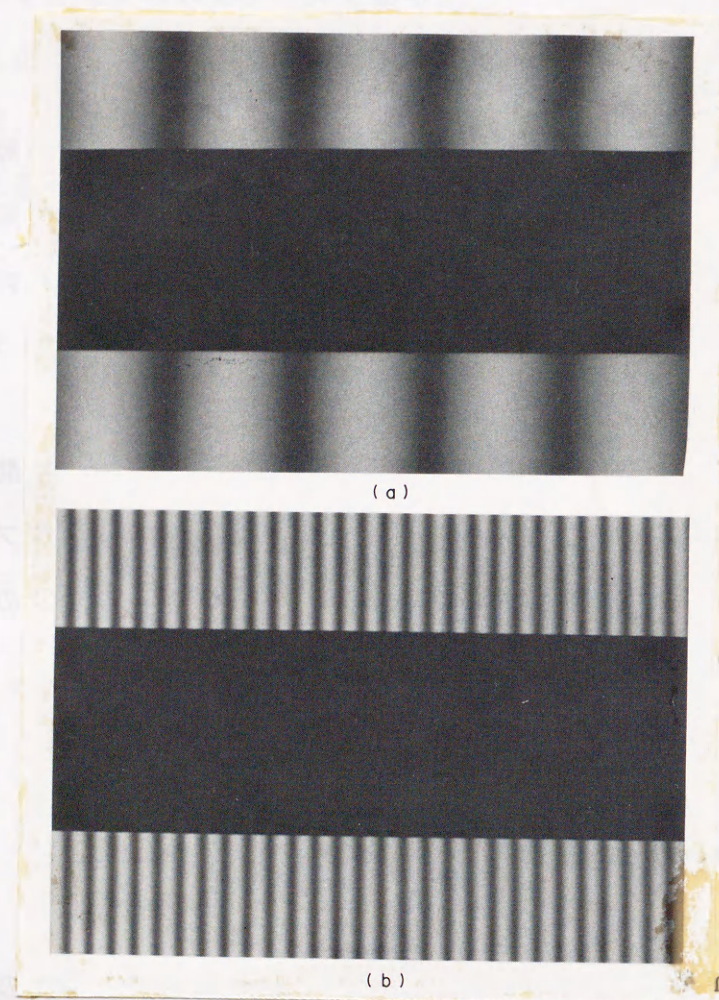


図2-1 視覚的ファントム（静止ファントム）をデモンストレーションする写真。aを薄暗い照明のもとで観察すると、黒縞の部分の帯の前面でつながるように知覚される。bのように誘導縞の空間周波数が高い場合にはファントムは生じない。(Gyoba, 1983 より)

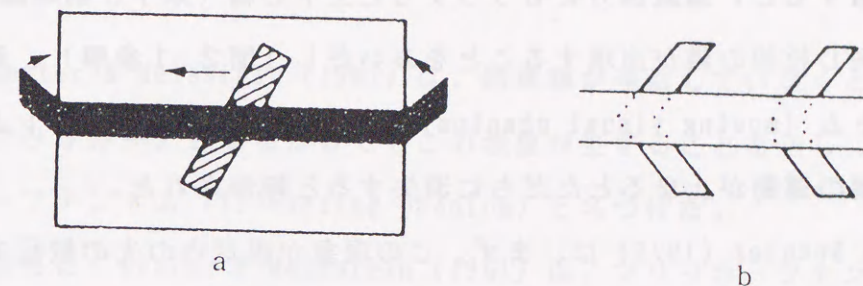


図2-2 Rosenbach 効果の刺激布置 (a)。角のある図形を帯の背後で動かすと、補間される部分は丸みをおびて見えるという (b)。(Metzger, 1953 より)



存しないことを示す好例であるとしている。

## 2-2 運動ファントム

Tynan & Sekuler (1975) は、運動縞の中央部分を水平に黒い不透明な帯で遮蔽すると、遮蔽部分にもうっすらと上下の縞（以下、誘導縞とよぶ）と同じ位相の縞が出現することをみだし（図2-1参照）、運動ファントム（moving visual phantom）と名づけた。運動ファントムは、誘導縞の運動が止まるとただちに消失すると報告された。

Tynan & Sekuler (1975) は、まず、この現象が眼球内の光の散乱で生じたアーチファクトではないことを証明するため、誘導縞の上領域と下領域について両眼分離提示を行い、融合の後、運動ファントムがあらわれることを確認した。

また、誘導縞の空間周波数が 3 c/deg 以下の粗い縞で生じること、コントラストが 0.25 程度の低い誘導縞で発生しやすいことを見出したが、この段階では、まだ組織的な実験が行われておらず、定量的なデータは示されていないかった。このとき、用いられた誘導縞の運動速度は 1 Hz、平均輝度は 60 cd/m<sup>2</sup>、帯幅は 3° であった。

さらにもう一つ、興味深い特性が報告されている。運動ファントムは、誘導縞の提示後、ただちに知覚されるわけではなく、誘導縞をある一定時間見つめているとあらわれてくる。この待機時間は「あたため期間（incubation period）」と名づけられた。

Tynan & Sekuler (1975) の論文には、Rosenbach 効果についての言及はみられず、運動ファントムが上述したようなユニークな特性をもつ

ことから、全く新しいタイプの補間現象として報告された。そして、盲点や暗点における補間と同じように、ある領域から得られた情報を他の領域まで拡張する視覚系の外挿過程のあらわれであると考えられた。

## 2-3 フリッカーファントム

Genter & Weisstein (1981) は、誘導縞が運動していなくとも、明滅（フリッカー）させるだけでもこの現象が生ずることを示し、フリッカーファントム（flickering phantom）と名づけた。

さらに、Genter & Weisstein (1981) は、フリッカーファントムを最も強く生じる誘導縞の最適空間周波数と最適時間周波数を求める心理物理学の実験を行った。ある一定の観察時間中、ファントムが知覚された時間のパーセントを算出してファントム視認度（phantom visibility）とすると、空間周波数に対するファントム視認度の同調曲線は、0.5 c/deg 付近にピークをもつローパスフィルターの特性を示すことがわかった。これは上述した Tynan & Sekuler (1975) の報告を裏づける結果となった。一方、時間周波数に対する同調曲線は 5 Hz 付近でピークとなり、ハイパスフィルターの特性を示した（3-2 参照）。

これらの同調曲線は、Breitmeyer & Ganz (1976) が整理した視覚系の下位チャンネルのうち、一過型チャンネルのそれらとよくにている。しかし、ファントムは一過型チャンネルの特性だけでは説明できない以下のような性質をもっていることも報告された。

帯が誘導縞の前面に位置するように奥行きをつけ、両眼で観察すると、フリッカーファントムの視認度が有意に減少する。また、誘導縞に X 字



型の模様をつけたところ、ファントムにもその模様がついて見えるという (Weisstein & Maguire, 1978)。

これらの結果から、Genter & Weisstein (1981) は、視覚的ファントムは、視覚系の低次過程と高次過程の両方が関与するユニークな現象であると結論した。

## 2-4 静止ファントム

Gyoba (1983) は、運動および明滅していない静止状態の誘導縞でも、その平均輝度が低く、暗室中で観察するなら、ファントムが知覚されることを示し、静止ファントム (stationary phantom) と名づけた。静止条件でも同様な補間がなされることは、Rosenbach (1902) もすでに報告しているが、視覚的ファントムとしては新しい発見となった。以下、Gyoba (1983) の研究を詳しく紹介する。

### 2-4-1 基本的手法

まず、最近の視覚研究で縞刺激 (grating) が広く用いられている理由について簡単にのべておく。

視覚刺激の変化次元は数多くあり、それらの組み合わせを考えれば測定条件数はすぐ無限になってしまう。そこで、少数の条件についての測定結果から、他の条件に対する応答が予測可能となる手法が必要とされる (行場, 1983 参照)。フーリエ理論によれば、すべての波形は、正弦波の集合として記述できるから、今、正弦波状に輝度変調された縞刺

激に対する視覚系の応答を調べておけば、任意の輝度分布をもつ視覚刺激に対する応答を予測できる可能性が生じる (図 2-3 参照)。この手法は、線形システム分析法 (linear system analysis) とよばれ、主に通信工学の分野で利用されてきた。情報科学で洗練されてきたこのような手法を視覚系の応答分析に積極的に適用していくのが視覚情報処理心理学の特色であり、本論の基本となるアプローチである。線形システム分析法の具体的な適用例は 3-1 で示す。

### 2-4-2 装置の基本構成

縞刺激を提示する方法で最もよく使われるのは、CRT を利用する電子技術的方法で、Campbell & Green (1965) らによって考案されたものである。Gyoba (1983) および行場 (1983) は、さらにマイクロコンピュータを導入して刺激パラメータを制御し、実験の自動化を行っている。装置の概要を図 2-4 に示す。

CRT (Texttronix 624) には、残光特性の短い P31 (緑発光) の蛍光体を用い、ビーム除去後、初期値の 10 % まで輝度が減衰するまでの時間は、40  $\mu$ sec 程度である。Y 軸には 100 KHz、X 軸には 100 Hz の鋸波をそれぞれのジェネレータから入力し、ラスタスキャンを行う。Z 軸には、輝度変調の直線性を保証するガンマ補正回路と、波形の提示時間をコントロールするアナログスイッチ回路を介して、波形ジェネレータより正弦波、あるいは矩形波を入力する。X 軸と Z 軸は、トリガー信号により同期をとり、またブランキング信号により帰線消去を行う。ワイパー回路は、画面中央部分にさらにブランキングをかけて、縞を二分する帯を作るものである。マイクロコンピュータの出力ポートにより、



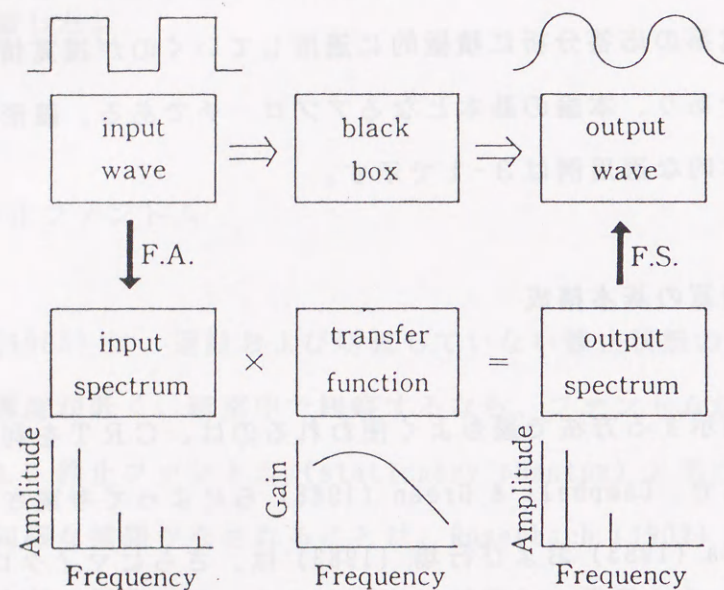


図 2-3 線形システム分析法の概要。F.A. はフーリエ分析をあらわし、F.S. はフーリエ合成の技法を示す。  
(Georgeson, 1979 より、一部改変)

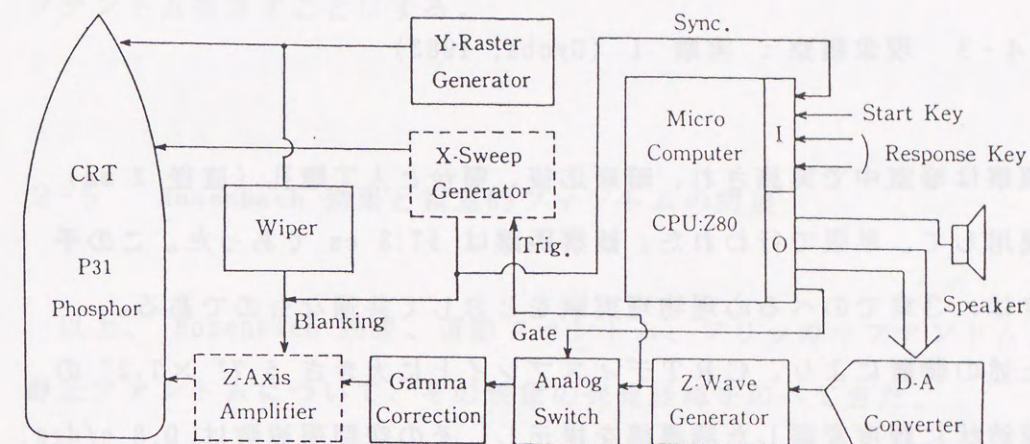


図 2-4 実験装置の基本構成。点線は C R T に内蔵されている部分。  
(行場, 1985 より)



縞の空間周波数、コントラスト、提示時間などを制御し、さらに用意の合図などを送る。また、入力ポートにより、被験者の反応を監視し、実験遂行の自動化がはかられている。

本論で報告する実験のほとんどは、上述したシステムを基本的に使用しており、以下の叙述では、大きな変更点がある場合のみ説明を追加することにする。

#### 2-4-3 現象観察：実験 I (Gyoba, 1983)

観察は暗室中で実施され、暗順応後、顎台と人工瞳孔（直径 2 mm）を使用して、単眼で行われた。観察距離は 57.3 cm であった。この手続きは、3章でのべる心理物理実験をとおして共通なものである。

上述の装置により、CRTディスプレイ上に大きさ  $5.7^\circ \times 7.2^\circ$  の正弦波状に輝度変調した誘導縞を提示し、その空間周波数は 0.8 c/deg、平均輝度は 8 cd/m<sup>2</sup>、コントラストは 0.6 であった。CRT中央に、幅  $4^\circ$  の黒い帯をつけた。帯の輝度は 0 に近く、輝度計で測定不能であった。CRTディスプレイを写真にとったものは、すでに図2-1に示してある。

実験の目的に関して naïve な被験者（大学生 10 名）に、帯の中央を凝視し、何が見えるかを報告するようにもとめた。誘導縞を静止した条件では、数十秒の観察の後、10 名の被験者全員が、誘導縞のうち、特に黒縞が帯の領域にもあらわれ、上下につながって見えると答えた。しかし、その見えは不安定であり、とくに画面を凝視して観察を続けると消失し、しばらくたつとまた見えてくるとの報告もあった。次に、誘導縞をゆっくりとしたスピードで動かすと、帯の領域の黒縞がより鮮明

に安定して見えると報告した。誘導縞を再び静止させると、その明瞭さは低下するが、依然として見え続けるとの報告がえられた。

静止ファントムに関する詳細な心理物理実験のデータは3章でのべる。また、これ以降、叙述の簡略化のために、「視覚的ファントム」と記した場合は運動ファントム、フリッカーファントム、静止ファントムを一括する総称とし、単に「ファントム」と記した場合には、もっぱら静止ファントムをさすことにする。

#### 2-5 Rosenbach 効果と視覚的ファントムの関連

以上、Rosenbach 効果、運動ファントム、フリッカーファントム、静止ファントムについて、その現象の発見経緯をのべてきた。

Tynan & Sekuler (1975) は、運動ファントムがユニークな特性をもち、しかも鮮明な効果であったことから、視覚系の外挿過程を反映する新しいタイプの錯視現象であると報告したが、Rosenbach (1902) の研究には気づいていなかった。ところが、1-2で行った分類法でいうと、Rosenbach 効果も視覚的ファントムも空間的補間でかつ感性的補間に属し、それらは同じ連続線上にある現象と考えることができる。Sekuler との議論 (personal communication) の結果、Sekuler とも彼らの研究が Rosenbach (1902) の拡張であることを認めている (Mulvanny et al., 1982)。

図2-5に示すように、Rosenbach 効果から静止ファントムにいたるにつれて、色や形態、運動などの知覚的手掛かりの関与が縮減してゆくと考えることができよう。そのため、現象の見える明瞭さは、知覚的手



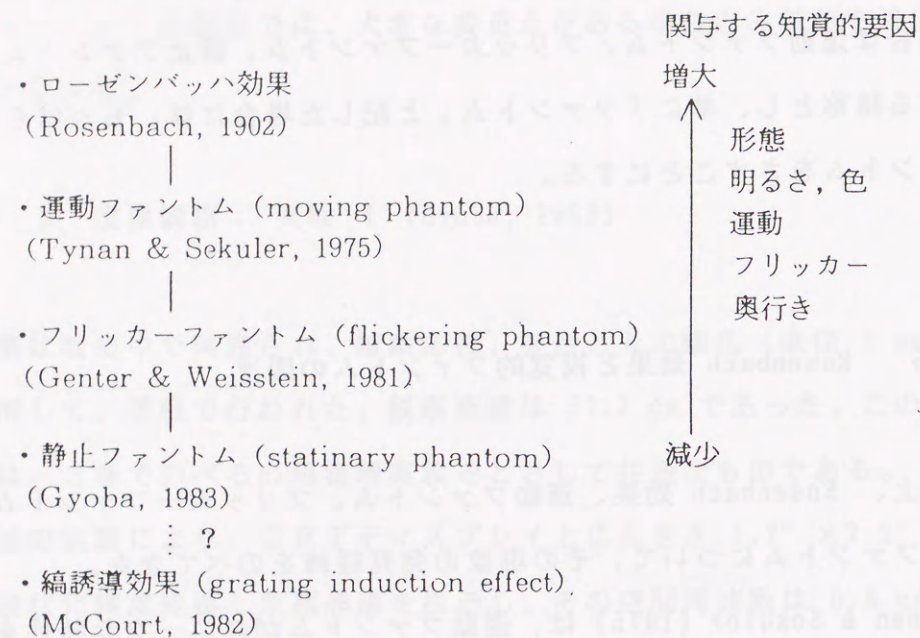


図2-5 Rosenbach 効果と視覚的ファントムの連続性。縞誘導効果が連続性をもつかどうかについての議論は、本論5章を参照のこと。

掛かりがもっとも還元された条件である静止ファントムにいたるにつれて、しだいに減少してゆくことも理解できる。

Rosenbach 効果は、知覚的手掛かりを豊富に含み、より日常に近い事態での現象といえるが、複数の要因が混入しており、心理物理実験は複雑になってしまう。一方、視覚的ファントムでは、縞刺激の導入により、2-4-1で紹介した効率のよい線形システム分析法が適用できるとともに、Campbell & Robson (1964)の研究以来、かなり明確にされてきた視覚系の空間周波数処理機構との対件をとりやすいことに研究上の大きな利点があると思われる。



### 3 視覚的ファントムの諸特性

この章では、線形システム分析法(2-4-1参照)を適用した心理物理実験から得られたデータにもとづき、視覚的ファントムの諸特性について詳細に検討する。

#### 3-1 空間周波数特性

視覚的ファントムは、誘導縞が細く、つまり空間周波数が高くなると消失するという特性をもっている(Tynan & Sekuler, 1975; Genter & Weisstein, 1981)。このことは、視覚的ファントムはもっぱら低空間周波数領域において成立する視覚現象であることを示しているが、以下の心理物理実験のデータ(Gyoba, 1983; 行場, 1983)はそれを裏づけるものであった。

##### 3-1-1 ファントムの臨界空間周波数: 実験 II (Gyoba, 1983)

ファントムが消失する限界にあたる臨界空間周波数(critical spatial frequency)を帯の幅を変化させて求めてみた。また、誘導縞の輝度変調を正弦波と矩形波にし、線形システム分析法の適用により、両者のデータの比較からファントムのカットオフ空間周波数を求めてみ



る。

### 3-1-1-a 方法

装置の基本構成と観察環境はすでに2-4で示した。CRTディスプレイ上に平均輝度  $8 \text{ cd/m}^2$ 、コントラスト 0.6 の正弦波または矩形波の誘導縞を提示し、帯幅を  $0.57^\circ \sim 4.56^\circ$  の 8 段階に設定した。帯の輝度は測光できないほど低いものであった。臨界空間周波数の測定は調整法により行った。被験者がキーを押すと同時に、誘導縞が5秒間提示され、もしファントムが見えれば Yes キーを押し、段階的により高い空間周波数の誘導縞が提示される手続きを、ファントムが消失する時点で No キーが押されるまで繰り返した。各条件について7回の測定を行った。被験者は正常な矯正視力をもつ4名（3名はナイーブ）であった。

### 3-1-1-b 結果および考察

図3-1に、1名の被験者のデータを示した。帯幅の増加にともない臨界空間周波数は低下する。正弦波のデータをみると、臨界時には帯幅が誘導縞の周期の約2～8倍になっている点が注目される。

また、矩形波のデータでは、広い帯幅条件では正弦波の時よりも臨界空間周波数は低くなるが、帯幅が狭くなり周波数が  $2.5 \text{ c/deg}$  以上になると両者の差はなくなる。

残りの3名の被験者についても、ほぼ同様の傾向を示すデータが得られ、正弦波と矩形波のデータが重なるポイントは  $1 \sim 3 \text{ c/deg}$  となった。

試みに、フーリエ理論を適用すれば、 $7.5 (2.5 \times 3) \text{ c/deg}$  以上の高

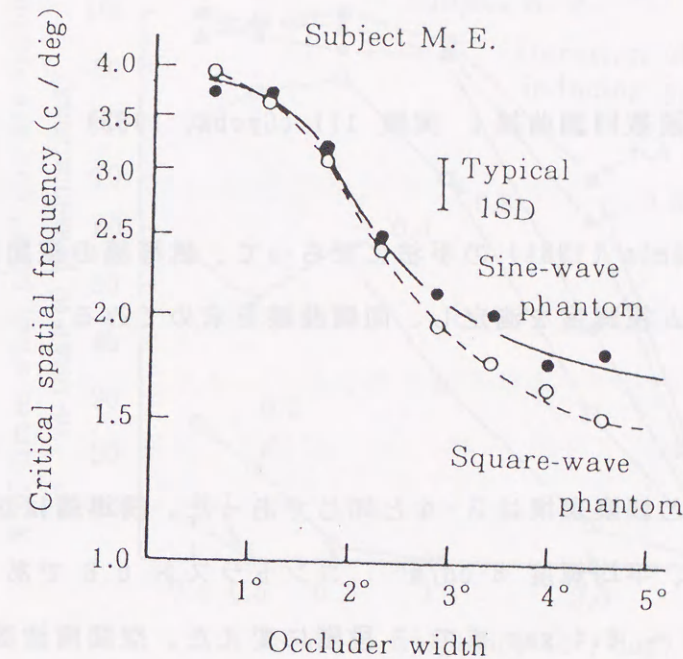


図3-1 帯幅の関数としてのファントムの臨界空間周波数。実線は誘導縞が正弦波のとき、破線は矩形波のときのデータを示す。臨界空間周波数が  $2.5 \text{ c/deg}$  以上になると両者は重なってしまう。  
(Gyoba, 1983 より)



周波数成分はファントムの見えに関与しないことになる。なお、矩形波のもつ振幅の大きいフーリエ基本波成分が関与している可能性はあるが、ファントムの見えの強さは3-5に示すように、コントラストの変化についてかなり安定しているので、この要因が関与している可能性は考えにくい。

### 3-1-2 空間周波数同調曲線：実験 III (Gyoba, 1983)

Genter & Weisstein (1981) の手法にならって、誘導縞の空間周波数に対するファントム視認度を測定し、同調曲線を求めてみる。

#### 3-1-2-a 方法

装置の基本構成と観察環境は2-4と同じであった。誘導縞は正弦波状に輝度変調され、平均輝度  $8 \text{ cd/m}^2$ 、コントラスト 0.6 であり、提示時間を 0.1 sec ~ 6.4 sec まで 7 段階に変えた。空間周波数は  $0.4 \text{ c/deg}$  ~  $3.6 \text{ c/deg}$  まで 6 種類用意した。帯幅は  $1.3^\circ$  であった。個々の条件につき、ランダムにそれぞれ 40 回の誘導縞提示を行い、ファントムが見えたかどうか、Yes/No キーを押して答えてもらった。ファントム視認度は、そのうちの Yes 反応の比率をパーセントで表して求めた。被験者は正常視力および正常な矯正視力をもつ 3 名（2 名はナイーブな被験者）であった。

#### 3-1-2-b 結果および考察

図3-2に1名のナイーブな被験者のデータを示す。同調曲線は明らかにローパス型特性を示し、誘導縞の提示時間が増すにつれて、同調曲

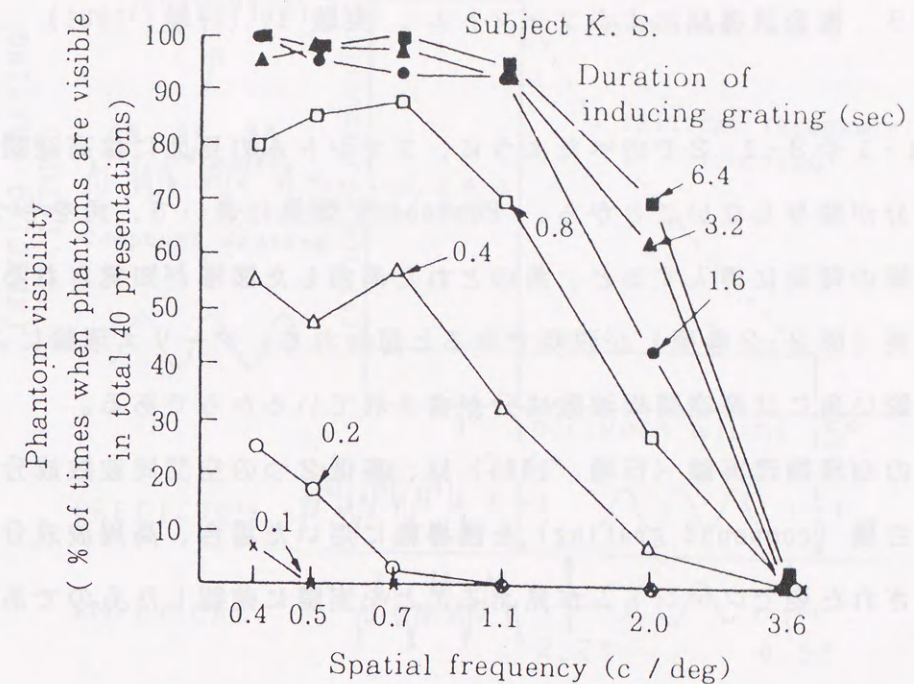


図3-2 ファントムの空間周波数同調曲線。誘導縞の提示時間を様々に変えて測定したもの。(Gyoba, 1983 より)



線が大きくふくらんでくるのがわかる。この帯幅 ( $1.3^\circ$ ) では、 $3.6$  c/deg 付近がカットオフ周波数であり、これは 3-1-1 で求めた値とほぼ一致する。他の 2 名の被験者のデータもほぼ同様な結果となった。

### 3-1-3 複合誘導縞によるファントム：実験 IV (行場, 1981)

3-1-1 や 3-1-2 でのべたように、ファントムの見えには高空間周波数成分が関与しないことから、Rosenbach 効果において、角をもつ図形を帯の背後に挿入すると、角のとれた湾曲した図形が知覚されるという事実 (図 2-2 参照) が説明できると思われる。フーリエ理論によれば、鋭い角には高空間周波数成分が含まれているからである。

以下の心理物理実験 (行場, 1981) は、高低 2 つの空間周波数成分をもつ複合縞 (compound grating) を誘導縞に用いた場合、高周波成分がカットされた姿でファントムが見えることを実際に確認したものである。

#### 3-1-3-a 方法

装置の基本構成および観察環境は 2-4 と同じ。Z 軸にアナログ加算器を加えて、 $0.8$  c/deg と  $3.2$  c/deg の単相誘導縞を加算したオーロラのような外見をもつ複合誘導縞を作った (図 3-3)。単相および複合誘導縞の平均輝度はともに  $8 \text{ cd/m}^2$  であるが、コントラストは、それぞれ  $0.25$  および  $0.45$  であった。マイクロコンピュータの制御により、帯幅を 5 秒おきに段階的に増減させて、複合誘導縞によるファントムの見えに変化がみられたポイントを調整法により 12 回ずつ測定した。また、単相誘導縞についても、ファントム消失時の帯幅を同じく調整法により測定した。被験者は正常な矯正視力をもつ 2 名 (1 名はナイ

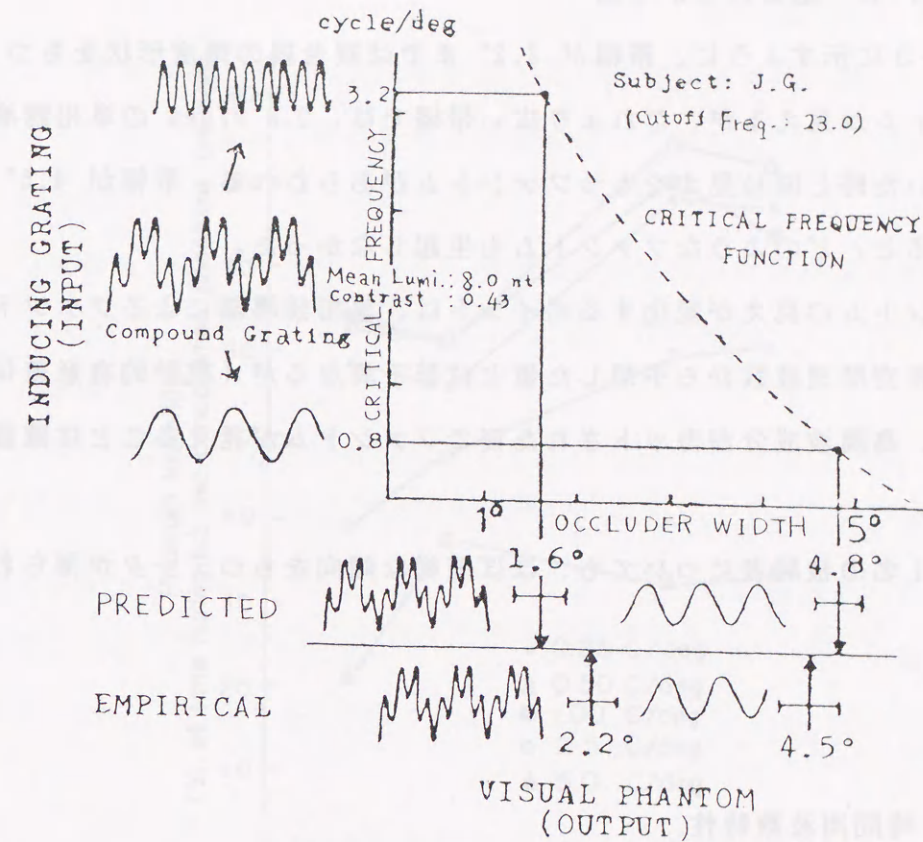


図 3-3 複合誘導縞によるファントム。複合誘導縞を提示 (INPUT) すると、その 2 つの成分の臨界空間周波数に対応する帯幅のところで、ファントムの見え (OUTPUT) が変化する。予測値 (PREDICTED) と実測値 (EMPRICAL) には若干の違いがみられるが、有意差はなかった。(行場, 1983 より)



ープ)。

### 3-1-3-b 結果および考察

図3-3に示すように、帯幅が $2.2^\circ$ までは複合縞の輝度形状をもつファントムが見えるが、これより広い帯幅では、 $0.8\text{ c/deg}$ の単相誘導縞を用いた時と同じ見えをもつファントムがあらわれる。帯幅が $4.5^\circ$ を過ぎると、どのようなファントムも生起しなかった。

ファントムの見えが変化するポイントは、単相誘導縞によるファントムの臨界空間周波数から予想した値とは若干異なるが(統計的有意差はなし)、高周波成分がカットされた姿でファントムが見えることは確認できた。

他の1名の被験者についても、ほぼ同様な傾向をもつデータが得られた。

### 3-2 時間周波数特性

ファントムが運動縞や明滅する縞でよく報告されてきた事実は、ファントムの最適時間周波数が高いものであることを示している。

Genter & Weisstein (1981) は、フリッカーファントムの時間周波数同調曲線を求めている(図3-4)。このときの、誘導縞の最大輝度は $1.1\text{ cd/m}^2$ で、帯幅は $2^\circ$ 、ディスプレイの大きさは $4^\circ \times 5^\circ$ であった。ファントム視認度として、65秒の観察時間中、ファントムが知覚された時間のパーセントを算出している。同調曲線のピークは、5～10 Hzの高い値にあることがわかる。

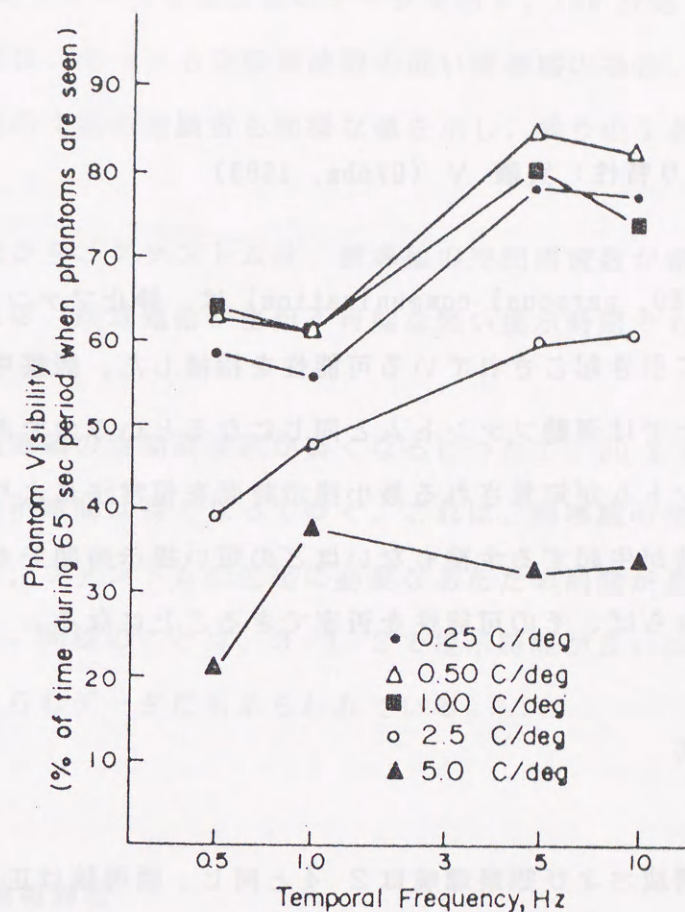


図3-4 フリッカーファントムの時間周波数同調曲線。5種類の空間周波数をもつ誘導縞についてもとめたもの。(Genter & Weisstein, 1981 より)



図3-4で、グラフを左側に外挿し、切片にあたる値、つまり時間周波数が0 Hzのときのファントム視認度が、静止ファントムのそれを示していると考えることができる。

### 3-3 立ち上り特性：実験 V (Gyoba, 1983)

Sekuler (1980, personal communication) は、静止ファントムが眼球運動によって引き起こされている可能性を指摘した。観察中に眼球が動けば、網膜上では運動ファントムと同じになるというのである。そこで、静止ファントムが知覚される最小提示時間を恒常法により測定した。もし、眼球運動が生起する余裕もないほどの短い提示時間でもファントムが生起するならば、その可能性を否定できることになる。

#### 3-3-1 方法

装置の基本構成および観察環境は2-4と同じ。誘導縞は正弦波状に輝度変調され、平均輝度  $8 \text{ cd/m}^2$ 、コントラスト 0.6 であり、提示時間を  $0.1 \text{ sec} \sim 12.8 \text{ sec}$  まで 8 段階に変えた。空間周波数は  $0.41 \text{ c/deg} \sim 2.89 \text{ c/deg}$  まで 5 種類用意した。帯幅は  $1.3^\circ$  であった。個々の条件につき、ランダムにそれぞれ 40 回の提示を行い、ファントムが見えたかどうか、Yes/No をキー押しで答えてもらった。恒常法により、Yes 反応が 50 % になる提示時間を求めた。被験者は正常な矯正視力をもつ 3 名 (2 名はナীব)。

#### 3-3-2 結果および考察

図3-5にナীবな被験者のデータを示す。Yes 反応が 50 % になる提示時間は、もっとも空間周波数の低い誘導縞の場合、200 msec となった。他の 1 名の被験者も同様な値を示し、残りの 1 名は 400 msec となった。

この結果から、ファントムは、誘導縞の空間周波数が帯幅に対して十分に低ければ、眼球運動が生起不可能な短い提示時間でも成立することがわかる。

一方、誘導縞の空間周波数が高くなるにつれて、50 % の Yes 反応が得られる提示時間は長くなってゆく。これは、誘導縞の空間周波数が高くなるほど、ファントムの生起に必要なあたため期間が長くなることを示している。同様のことは、3-1-2で提示時間が長いほど同調曲線が大きくふくらむデータにもあらわれている。

#### 3-4 最適帯輝度

McCourt (1982) は、ファントムと同一の刺激布置を使って、帯の明るさを誘導縞の平均輝度と同じにした場合、誘導縞と逆相の縞が知覚されることを示し、縞誘導効果 (grating induction effect) と名づけている (5章参照)。縞誘導効果では、上下の縞は分断して見え、補間は生じない (図3-7b参照)。

帯で遮蔽されている部分が補間されるか、されないかは帯の輝度が重要な要因になっていると考えられる。そこで、Sakurai & Gyoba (1985)



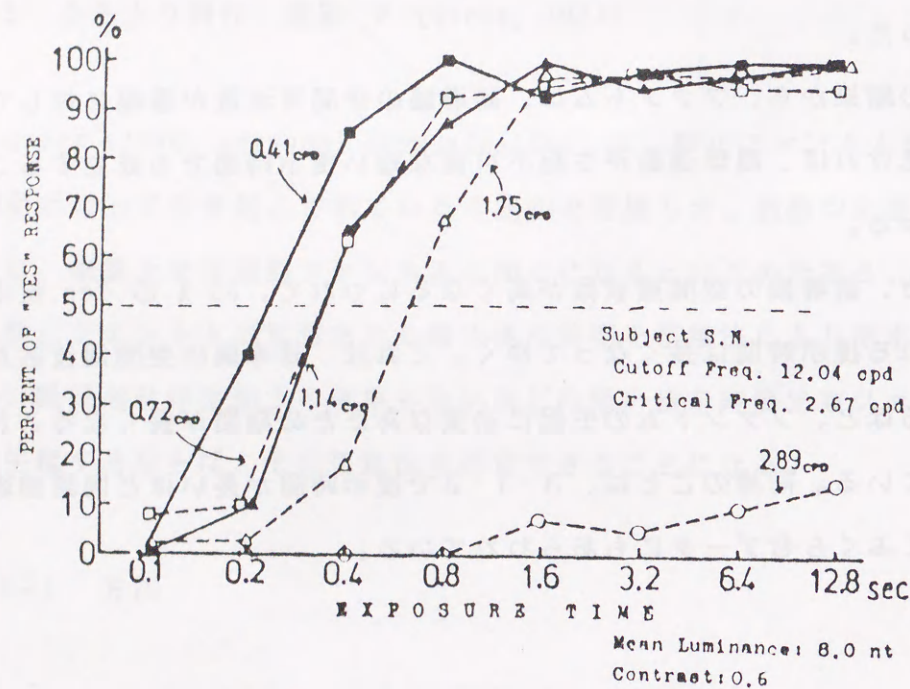


図3-5 ファントムの立ち上がり特性。5種類の空間周波数の誘導縞について、ファントムが知覚される最小提示時間をもとめたもの。  
(Gyoba, 1983 より)

は、ファントムの最適帯輝度レベルを求めてみた。

### 3-4-1 帯幅をパラメータとした場合：

実験 VI (Sakurai & Gyoba, 1985)

帯幅を4条件に設定し、それぞれの条件について帯輝度を変化させ、静止ファントムの視認度を測定してみる。

#### 3-4-1-a 方法

装置の基本構成と観察環境は2-4と同じであるが、次のような変更点があった。帯はZ軸信号をワイパー回路によりブランキングして作り、その輝度をコンピュータ制御できるようにした。これを容易にするため、X軸に17 kHz、Y軸に60 Hzの鋸波を入れたラスタースキャンにした。ディスプレイの大きさは $7^{\circ} \times 10^{\circ}$ 、誘導縞は正弦波状に輝度変調され、空間周波数0.5 c/deg、コントラスト0.5、平均輝度8 cd/m<sup>2</sup>であった。帯幅を0.5 ~ 4°までの4種類に設定し、帯輝度は0.5 ~ 15.5 cd/m<sup>2</sup>の7条件を用意した。

被験者は、正常視力および正常な矯正視力を有する4名(3名はナイス)であった。実験を開始する前に、ファントムの写真をみせて説明し、「帯の前面を通して上下の縞がつながって見える」という基準が満たされている間、キーを押すように教示された。帯幅4条件×帯輝度7条件の計28条件のそれぞれについて、1試行40秒の観察を4回づつランダムに行った。キーが押されていた累積時間が測定され、その百分率をファントム視認度とした。



### 3-4-1-b 結果および考察

図3-6に2名(1名はナイブ)の被験者のデータを示す。どちらのデータをみても帯幅によるファントム視認度の違いはほとんど認められないが、帯輝度によって劇的に変化することがわかる。帯輝度が高くなるにつれてファントムの見えは急激に悪くなり、誘導縞の平均輝度に近づくとほとんど消失する。

興味深いのは、帯輝度がさらに高くなるにつれてファントム視認度は回復し、全体としてV字型の関数を得られたことである。つまり、ファントムには2つの最適帯輝度レベルがあるのである。残りの2名の被験者のデータもほぼ同じような傾向を示した。

現象的には、帯輝度が低いほうでは、誘導縞の暗い部分がつながる黒ファントム(black phantom)が見えるのに対し、高いほうでは、明るい部分がつながる白ファントム(white phantom)が知覚される(図3-7 a c 参照)。

また、平均輝度レベル付近では逆相の縞があらわれ、上下の縞は分断して見えると報告された(図3-7 b)。これは McCourt (1982) の縞誘導効果に対応している(5章参照)。

### 3-4-2 誘導縞のコントラストをパラメータとした場合:

実験 VII (Sakurai & Gyoba, 1985)

今度は、ファントムの最適帯輝度レベルを誘導縞のコントラストをパラメータにして求めている。

### 3-4-2-a 方法

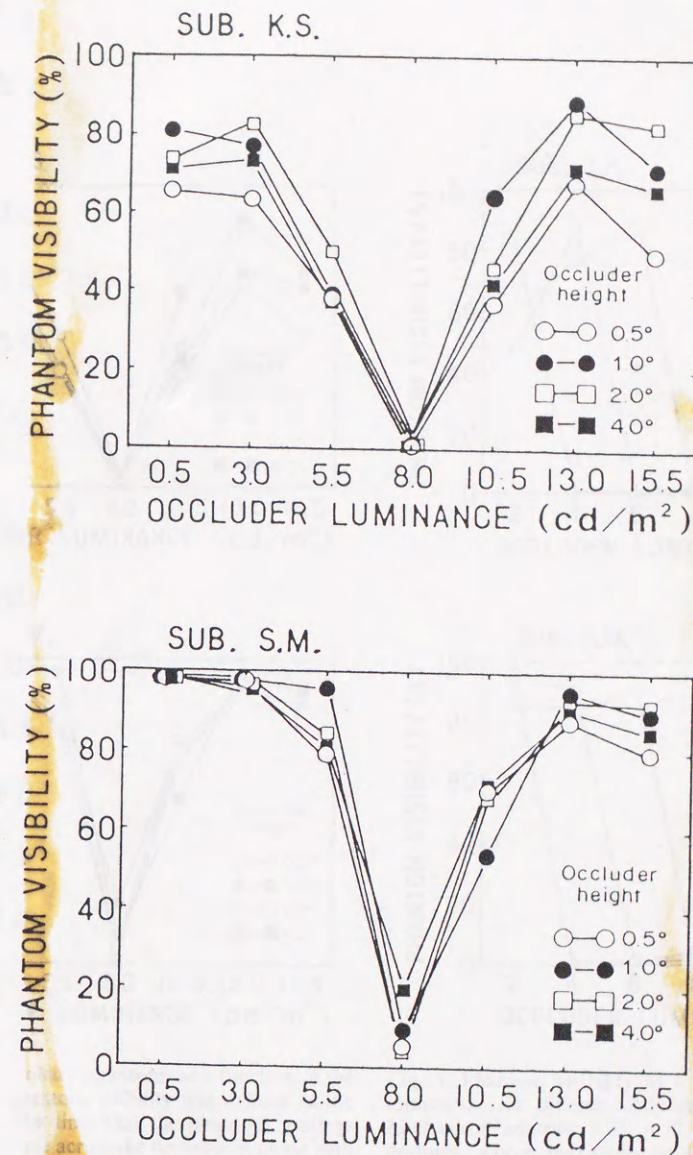


図3-6 帯輝度の関数としてのファントム視認度。個々のカーブは、異なる帯幅条件のデータをあらわしている。

(Sakurai & Gyoba, 1985 より)



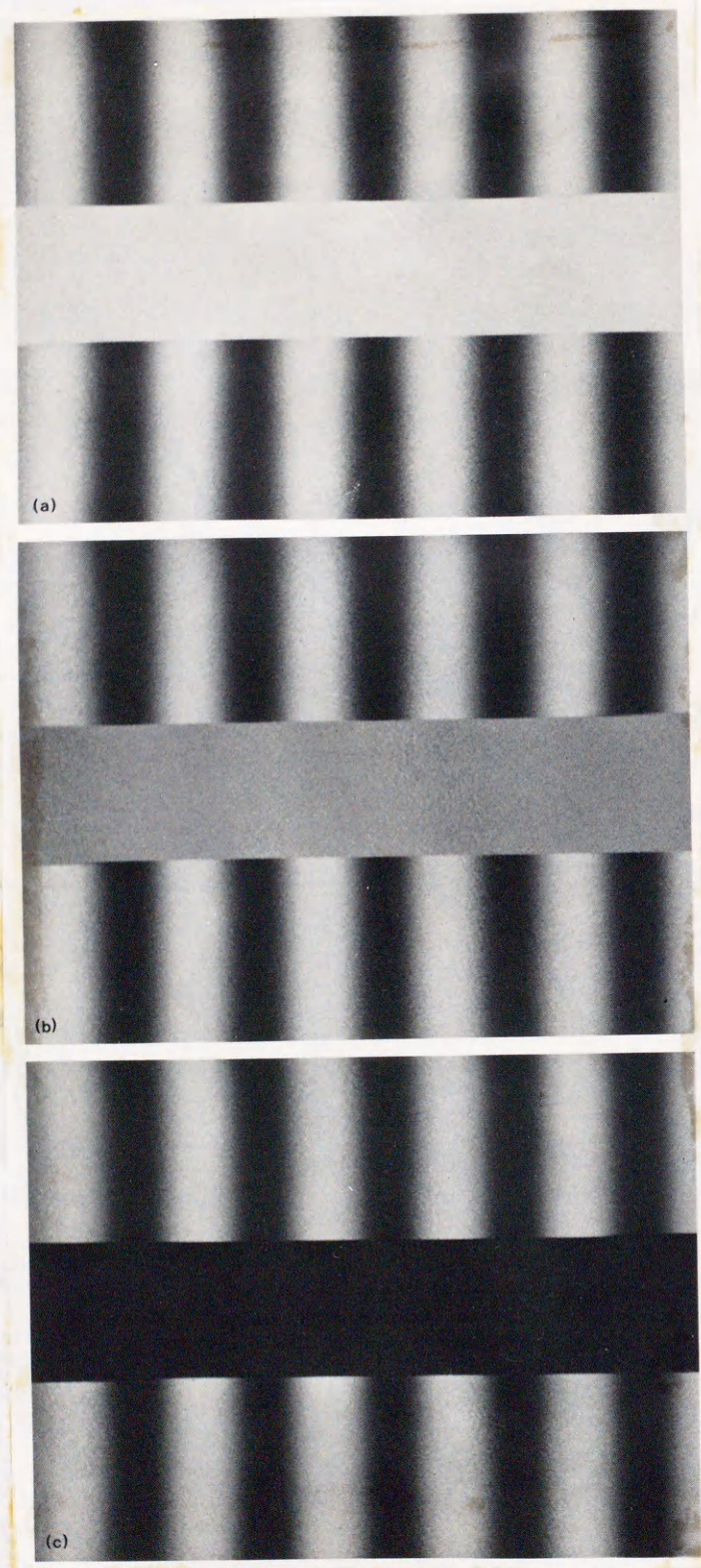


図3-7 帯輝度の違いによるファントムの見えの変化を示すデモンストレーション。(a) 帯輝度が誘導縞の最高輝度レベルにある場合、縞の明るい部分がつながる白ファントムがあらわれる。(b) 帯輝度が誘導縞の平均輝度レベルにあるときには縞誘導効果、つまり帯の領域に逆相の縞が知覚される。(c) 帯輝度が誘導縞の最低輝度レベルにある場合には、縞の暗い部分がつながる黒ファントムが知覚される。(Sakurai & Gyoba, 1985 より)

以下の点を除いて、基本的に3-4-1-aと同じであった。今度は、帯幅が $2^\circ$ に固定され、誘導縞のコントラストは0.25～0.75の3種に設定した。帯輝度は $2 \sim 14 \text{ cd/m}^2$ まで $2 \text{ cd/m}^2$ のステップで変化させた。

被験者は、3-4-1の実験に参加した経験のある3名(2名はナイーブ)であった。誘導縞のコントラスト3条件×帯輝度7条件の計21条件のそれぞれについて、1試行40秒の観察を6回づつランダムに行った。

#### 3-4-2-b 結果および考察

図3-8にナイーブな2名の被験者のデータを示す。全体として、3-4-1と同じV字型の視認度曲線が得られているが、興味深い点は、各コントラスト条件の誘導縞の最小および最大輝度に対応する値のところでピークを示すデータが得られていることである。これらは、それぞれ黒ファントムおよび白ファントムの最適帯輝度レベルを表わすと考えられる。残りの1名の被験者についてもほぼ同様の傾向を示すデータが得られた。

#### 3-4-3 矩形波誘導縞によるファントムの最適帯輝度：

実験 VIII (櫻井・行場, 1986)

実験VIIのデータによると、帯輝度が最適レベルにあるとき、誘導縞のもっとも明るい、あるいは暗い部分と帯の輝度が等しくなり、この間の境界はなくなる。誘導縞と帯との間の輝度境界の部分的欠落がファントムの生起を促進している可能性が考えられる。



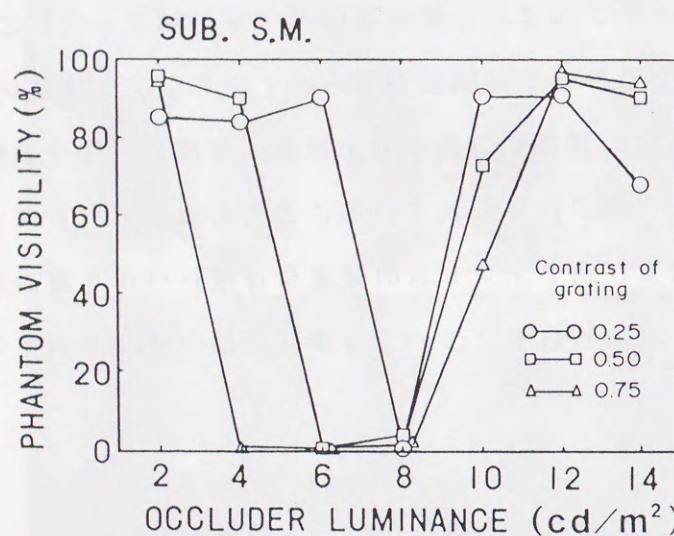
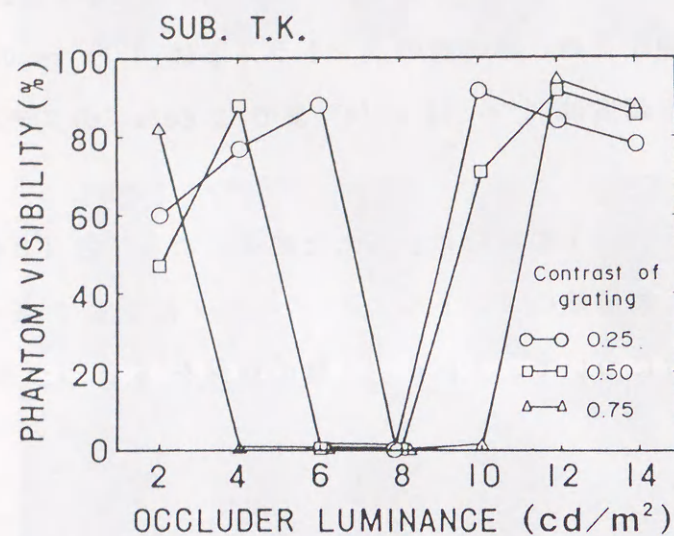


図3-8 帯輝度の関数としてのファントム視認度。個々のカーブは、異なる誘導縞のコントラスト条件のデータをあらわしている。  
(Sakurai & Gyoba, 1985 より)

これを検討するため、誘導縞の波形を矩形波にし、黒縞あるいは白縞と帯の間の輝度境界を完全に無くしたとき（図3-9）、ファントムの見えがもっとも促進されるのかどうか調べた（櫻井・行場，1986）。

#### 3-4-3-a 方法

誘導縞の輝度形状を矩形波にしたこと以外、3-4-2-aと同じであった。被験者は、3-4-2-aの実験に参加した経験のある3名（2名はナイーブ）。

#### 3-4-3-b 結果および考察

2名の被験者のデータを図3-10に示す。矩形波誘導縞の場合には、正弦波と比べて、ファントムの見えが低くなることが指摘されてきたが（Tynan & Sekuler, 1975; Gyoba, 1983）、今回の結果でもファントム視認度は全体的にやや低めで、その傾向は認められる。

最適帯輝度は、正弦波誘導縞のときと違って、誘導縞の最大・最小輝度と一致していない。むしろ、帯輝度がそれらよりも一段階高い、あるいは低い場合にもっともファントム視認度が高いことが認められる。残りの1名のデータにも同様の傾向がみられた。つまり、矩形波のときには、誘導縞と帯との輝度境界がわずかにあったほうがファントムが知覚されやすいのである。このことは、以下のような現象的観察結果と対応している。

輝度境界が欠落しているとき、静止状態では、誘導縞と帯は結合して櫛状の形をした単一の平面として知覚されてしまう。ファントムが見えるためには、誘導縞は帯と別個の対象として知覚されなければならないのである。この意味で、誘導縞の運動やフリッカーは、帯との対象分離



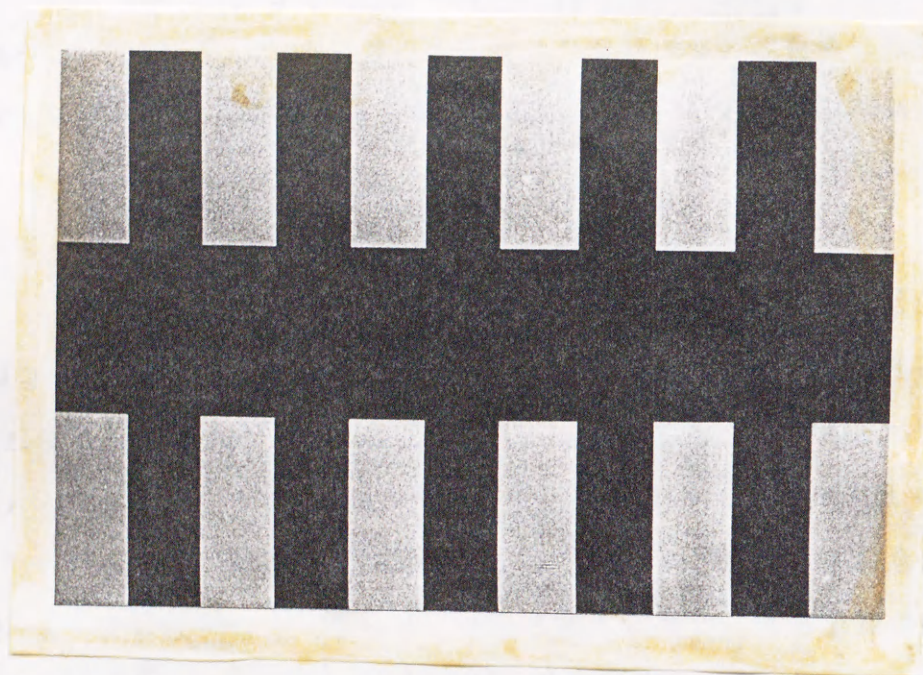


図3-9 矩形波誘導縞によるファントム。帯輝度が黒縞のレベルと一致していると、ファントムは知覚されにくい。  
(櫻井・行場, 1986 より)

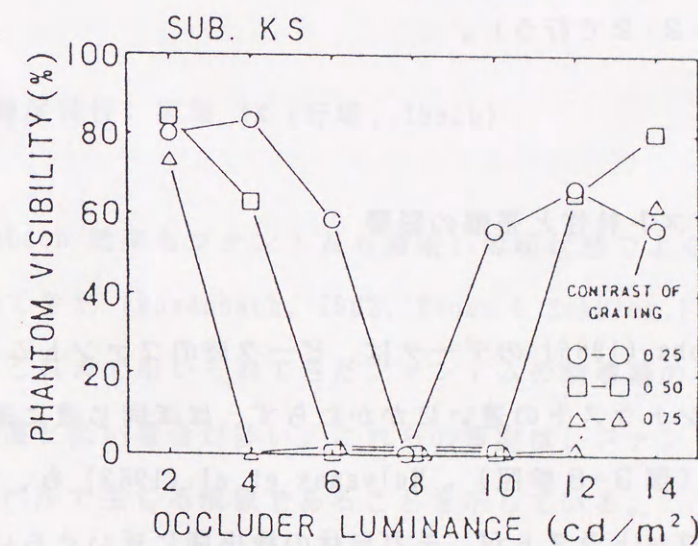
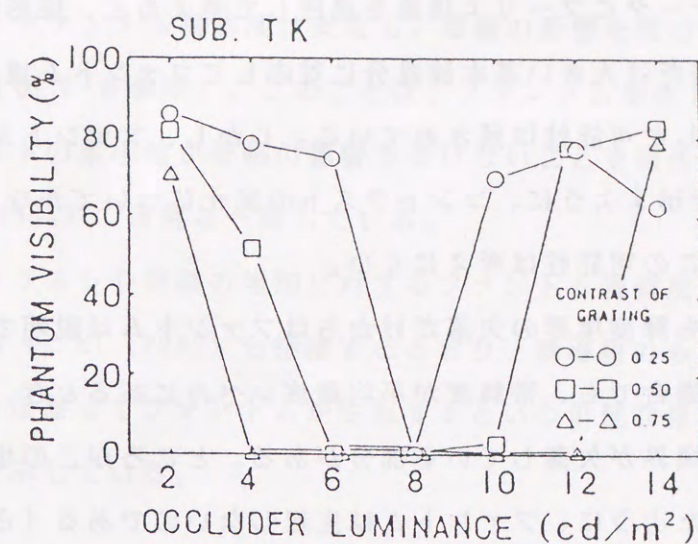


図3-10 矩形波誘導縞によるファントムの視認度におよぼす帯輝度の影響。(櫻井・行場, 1985 より)



を行うはたらきもしていると考えられる。

図3-10のデータにフーリエ理論を適用して考えると、矩形波のもつ振幅が $4/\pi$ 倍だけ大きい基本波成分に対応してファントム視認度のピークがシフトした可能性は残されている。しかし、ファントムの見えの強さは3-5で示すように、コントラストの変化についてかなり安定しているので、この可能性は考えにくい。

いずれにしても輝度境界の欠落だけからはファントムは説明できない。正弦波誘導縞の場合でも、帯輝度が平均輝度レベルにあるとき、誘導縞と帯の間の輝度境界が欠落している部分がある。ところがこの場合には、3-4-2で示したように、ファントムは生起しないのである（さらに詳しい議論は、6-2-2で行う）。

### 3-5 コントラスト特性と帯幅の影響

Sakurai & Gyoba (1985) のデータは、ピーク時のファントム視認度は、誘導縞のコントラストの違いにかかわらず、ほぼ同じ値に達することを示している（図3-8参照）。Mulvanny et al. (1982) も、ファントムは誘導縞のコントラストが、それ自体の検出閾に近いぐらい低い場合でも知覚されることを報告している。

両者の研究を合わせて考えると、ファントムは、誘導縞にわずかなコントラストがあれば知覚されるが、コントラストがある値、大きくとも0.25以上に増加すれば、視認度はすぐに飽和してしまうことがわかる。

一方、帯幅の増加にともない臨界空間周波数は低下し、臨界時には帯幅が誘導縞の周期の約2～8倍になることはすでにのべた（Gyoba,

1983）。しかし、Sakurai & Gyoba (1985) は、臨界周波数を越えない範囲では、ファントム視認度は安定し、帯幅の影響を受けないことを示している（図3-6参照）。このことは、ファントムを生じる誘導縞のコントラストの最小値が帯幅の影響を受けないことを報告した Mulvanny et al. (1982) の研究と一致している。

コントラストや帯幅の増加に対するファントム視認度の非線形性は、Mulvanny et al. (1982) も指摘するとおり、誘導縞のもつエネルギーが空間的に伝播してファントムが生起するという単純な見方が成り立たないことを示している。

### 3-6 輝度特性：実験 IX（行場，1991b）

Rosenbach 効果もファントムも薄暗い照明状態でよく観察されると報告されてきた（Rosenbach, 1902; Tynan & Sekuler, 1975; Gyoba, 1983）。これまで用いられてきたファントムの誘導縞の平均輝度も  $10 \text{ cd/m}^2$  程度と低い場合が多い。これらの事実は、ファントムは薄暮視、暗所視レベルで生じる現象であることを示している。

一方、McCourt (1982) の縞誘導効果で用いられる誘導縞は、その平均輝度が  $60 \text{ cd/m}^2$  と高い場合が多い。最近、McCourt (1990) は、縞誘導効果が明所視レベルで生じる現象であることを報告している（5-1参照）。

そこで、誘導縞の平均輝度を明所視レベルから暗所視レベルまで変化させ、ファントム視認度を求めてみる。



### 3-6-1 方法

パソコン (SHARP:X68000) を用いて、ディスプレイ (SHARP:CZ603D) 上に、正弦波状に輝度変調された誘導縞を提示した。その空間周波数は  $1.43 \text{ c/deg}$ 、大きさは  $5.25^\circ \times 7.25^\circ$ 、帯幅は  $2.5^\circ$  一定で、観察距離は  $114 \text{ cm}$  であった。誘導縞の平均輝度は、直径  $2 \text{ mm}$  の人工瞳孔の前に、NDフィルター (Kodak Wratten Gelatin Filter) を入れることにより、 $80$ 、 $20$ 、 $5$ 、 $1.25$ 、 $0.31 \text{ cd/m}^2$  の 5 段階に変化させた。コントラストは  $0.875$  で一定。

被験者は、正常矯正視力をもち、実験目的に関してナイブな 6 名。暗室中で、縞の中央付近を右目で凝視し、黒縞に注目して、それが上下につながって見える間、キーを押すよう求められた。5つの平均輝度条件につき、半数の被験者は明るい条件から暗い方条件へ、そして再び明るい条件へ向かう順序で、1回  $25 \text{ sec}$  の観察を、のべ  $100 \text{ sec}$  行い、キー押しの累積時間が記録された。総観察時間に対するそれらの値の割合を算出して、ファントム視認度とした。残りの半数の被験者は逆の順序で測定を行った。

### 3-6-2 結果および考察

各平均輝度レベルにつき、被験者のデータの中央値をとってプロットしたのが図3-11である。

$80 \text{ cd/m}^2$ 、 $20 \text{ cd/m}^2$  のときのファントム視認度は低く、ファントムがほとんど生起していないことを示している。 $10 \text{ cd/m}^2$  以下の平均輝度になると視認度は上昇をはじめ、もっとも暗い条件 ( $0.31 \text{ cd/m}^2$ ) で

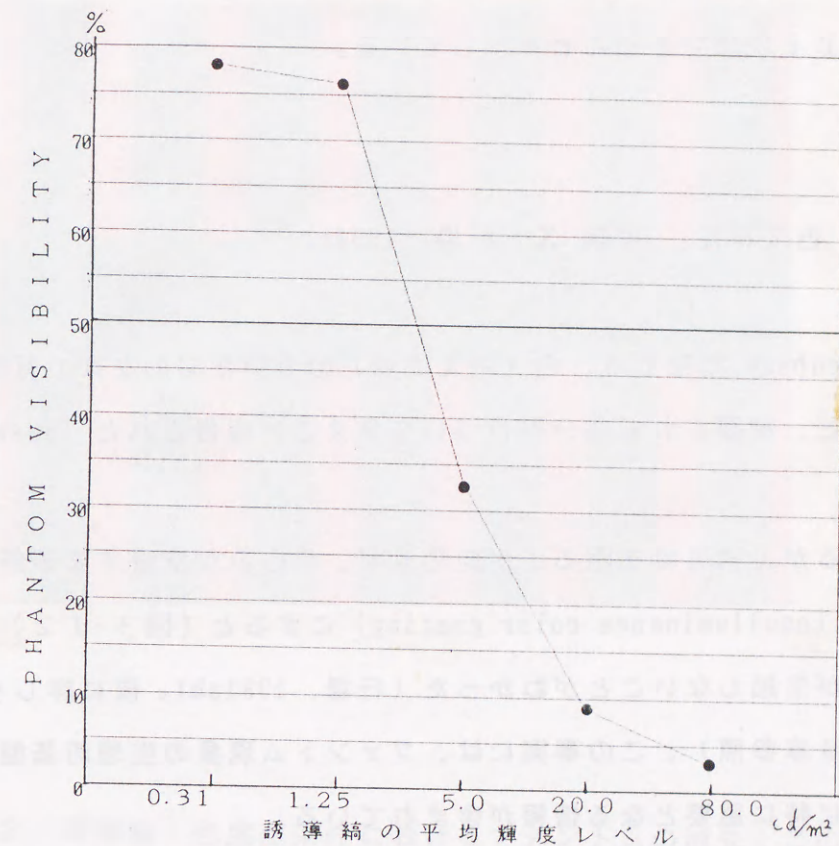


図3-11 ファントムの輝度特性。誘導縞の平均輝度が低いときにファントム視認度は高くなる。(行場, 1991 より)



は 80 % 近くに達する。

Sekuler & Blake (1985) によれば、 $10 \text{ cd/m}^2$  程度以上は明所視レベル、 $1 \sim 10 \text{ cd/m}^2$  程度は薄暮視、 $1 \text{ cd/m}^2$  程度以下は暗所視と大別されている。上述したデータはファントムが薄暮視、あるいは暗所視レベルで生じる現象であることを示している。

### 3-7 色度特性：実験 X (行場, 1991b)

Rosenbach 効果では、色（例えば赤）のついた図形を帯の背後に挿入すると、補間される部分も色づいて見えると報告された (Rosenbach, 1902)。

ところが、誘導縞を明るさが変化せず、色のみが交替する等輝度・色度差縞 (equiluminance color grating) にすると (図 3-12)、ファントムが生起しないことがわかった (行場, 1991ab)。後に詳しくのべるが (8 章参照)、この事実には、ファントム現象の生理的基盤を考察する際に特に重要となる情報が含まれている。

等輝度・色度差刺激を作成する場合に問題となるのは、等輝度をいかに定義するかである。物理的に等輝度にしても、視覚系にとって等輝度と感受されるわけではない。よく用いられる手法に、フリッカーフォトメトリー (flicker photometry) がある。これは、例えば、同一位置に赤と緑の小円を  $16 \text{ Hz}$  程度で交替提示すると、両者の感覚上の輝度が一致すると融合して見え、そうでないとフリッカーが知覚されることを利用する手法である。

今回の実験では縞刺激を用いているので、Anstis & Cavanagh (1983)

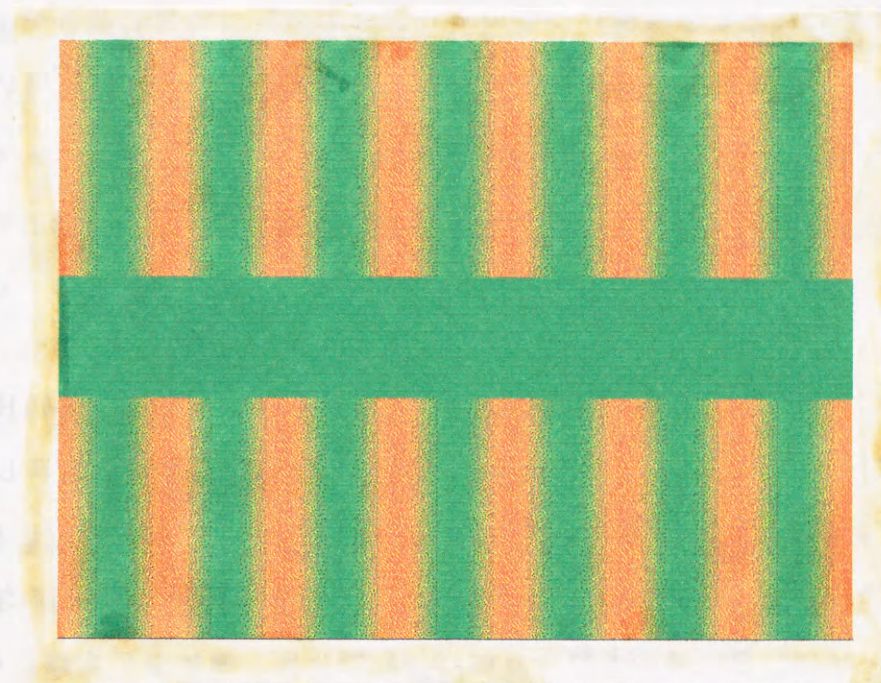


図 3-12 等輝度・色度差条件におけるファントムの消失。この図の場合、印刷の関係で等輝度とはいえないが、ファントムの視認度は弱まることわかる。



が考案した最小運動法 (minimal motion technique) を採用することにする。これは、正弦波状に輝度変調をかけた赤と緑の縞刺激を、位相を  $180^\circ$  変えて重ね合わせ、しかもその位相を 10 Hz 程度で交替させると、輝度変調が感覚上で等輝度にならない場合には縞の運動が知覚されるが、等輝度のときには運動が知覚されず、融合して見えることを指標に用いた手法である。

### 3-7-1 方法

パソコン (SHARP:X68000) を用いて、ディスプレイ (SHARP:CZ603D) 上に、位相を  $180^\circ$  ずらして重ね合わせた赤と緑の正弦波縞を提示した。ディスプレイ上での赤と緑の色度座標 (CIE:x,y) は、それぞれ (0.60, 0.34)、(0.30, 0.59) であった (Topcon:BM-7 で測定)。緑縞の平均輝度は  $3.0 \text{ cd/m}^2$  で、コントラストは 0.65 で一定。赤縞の平均輝度も  $3.0 \text{ cd/m}^2$  であるが、コントラストは 0.0 ~ 1.0 まで、6 段階に設定した。帯の輝度および色度は、それぞれのコントラスト条件において緑の輝度が最大で、赤の輝度が最小となるポイントと同じになるように設定した。この設定では、緑縞のピークと帯との境界が部分的に欠落するので、緑ファントムがあらわれやすいはずである (3-4 参照)。ディスプレイの大きさは  $5.25^\circ \times 7.25^\circ$ 、縞の空間周波数は  $0.97 \text{ c/deg}$  で、帯幅は  $1.1^\circ$  一定であった。

被験者は、正常視力および正常矯正視力をもち、実験の目的に関してはナイーブな 10 名。暗室中で、114 cm の距離をおいて帯の中央付近を両眼で凝視し、緑色を含む縞に注目して、それが上下につながって見える間、キーを押すよう求められた。6 つの赤縞のコントラスト条件に

つき、ランダムな順序で 25 sec ずつ、のべ 100 sec の観察を行い、キー押しの累積時間が記録された。総観察時間に対するそれらの値の割合を算出して、ファントム視認度とした。

最小運動法で感覚上の等輝度を測定するときには、赤縞と緑縞の位相を 13 Hz で交替させ、被験者は、赤縞のコントラストが 0.0 ~ 1.0 まで 9 段階に変化させた条件を観察し、縞の運動印象の有無を答えた。このとき帯はつけなかった。この測定は、ファントム視認度測定の後に行われた。

### 3-7-2 結果および考察

赤縞のコントラスト条件につき、被験者のデータの中央値をとってプロットしたのが図 3-13 である。

ファントム視認度は一般に低い、特に赤縞のコントラストが 0.3 (緑縞のコントラストに対する比が 0.46) の場合にはほとんどファントムが生起しないことがわかる。このとき、赤縞のピーク輝度の緑縞のそれに対する比をとってみると、0.80 になった。

一方、最小運動法による等輝度の測定結果は、赤縞のコントラストが 0.3 (緑縞とのコントラスト比が 0.46) であり、両者はぴったり一致した。

この結果から、ファントムは発生するためには誘導縞に輝度差があることが必要であり、等輝度条件のときには消失することがわかる。したがって、Rosenbach (1902) の研究で、色のついた補間がなされたのは、図形と周囲との輝度差が存在したためといえる。



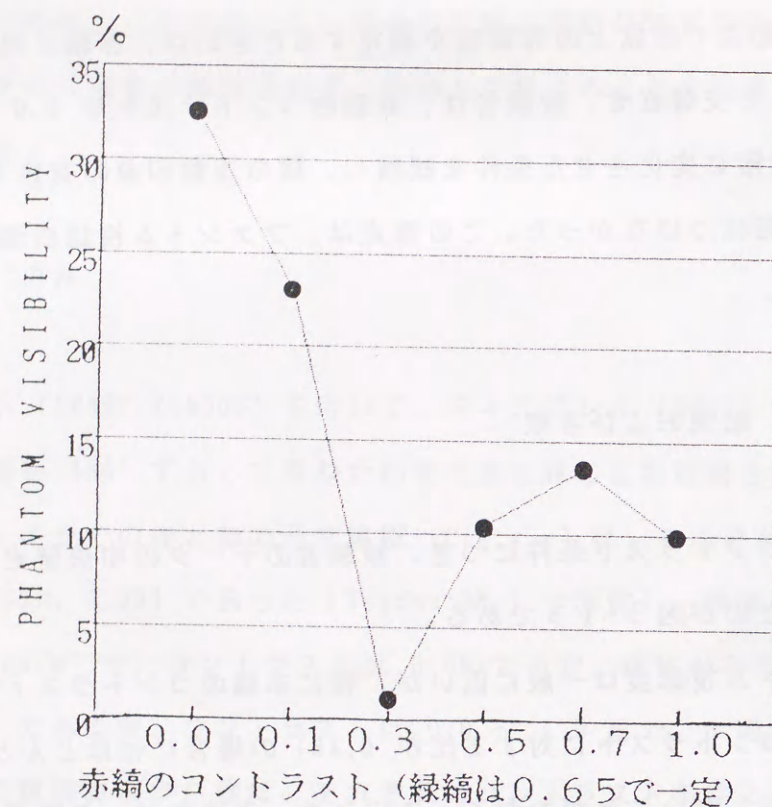


図3-13 誘導縞を等輝度・色度差条件にした場合のファントム視認度。180°位相の異なる緑縞と赤縞を重畳する。緑縞のコントラストは一定にして、赤縞のコントラストを変化させる。物理的な等輝度は、赤縞のコントラストが0.65付近のときであるが、最小運動法により求めた主観的等輝度点におけるコントラストは0.3であった。

### 3-8 方位特性：実験 XI（行場，1992a）

視覚刺激には方位（orientation）という重要な変数がある。また、種々の錯視、例えば Poggendorff 錯視などには、方位によって錯視量が変化する空間的異方性があることが知られている（6-5 参照）。そこで、誘導縞の縞の方位を帯に対して斜めにし、視覚的ファントムがどのようなあらわれ方をするのか検討した。

#### 3-8-1 方法

パソコン（SHARP:X68000）を用いて、ディスプレイ（SHARP:CZ603D）上に、平均輝度  $8 \text{ cd/m}^2$ 、コントラスト 0.75 の正弦波状に輝度変調された誘導縞を、円形状に提示した。これは、できるだけ外部の方位枠組みの影響を少なくするように配慮したためである。

誘導縞の方位は帯に対して  $45^\circ$  に傾け、斜め方位（帯は水平）をもつ斜め縞条件（図3-14A）と、垂直方位（帯は斜め）をもつ垂直縞条件（図3-14B）を用意した。

さらに、誘導縞の空間周波数が  $1 \text{ c/deg}$  の低周波条件と、 $3 \text{ c/deg}$  の高周波条件をそれぞれ設けた。刺激円の大きさと帯幅は帯の周波数に比例して、低周波条件は直径  $8^\circ$  と幅  $1.4^\circ$ 、高周波条件は直径  $2.7^\circ$  と幅  $0.47^\circ$  に調整した。帯幅は、ちょうど位相が一周期ずれた縞どうしが最短距離で連結可能になるように設定した。

被験者はのべ 18 名で、実験の目的に関してナীবであり、正常視力または矯正正常視力を持ち、乱視がないことをチェックされた。半数



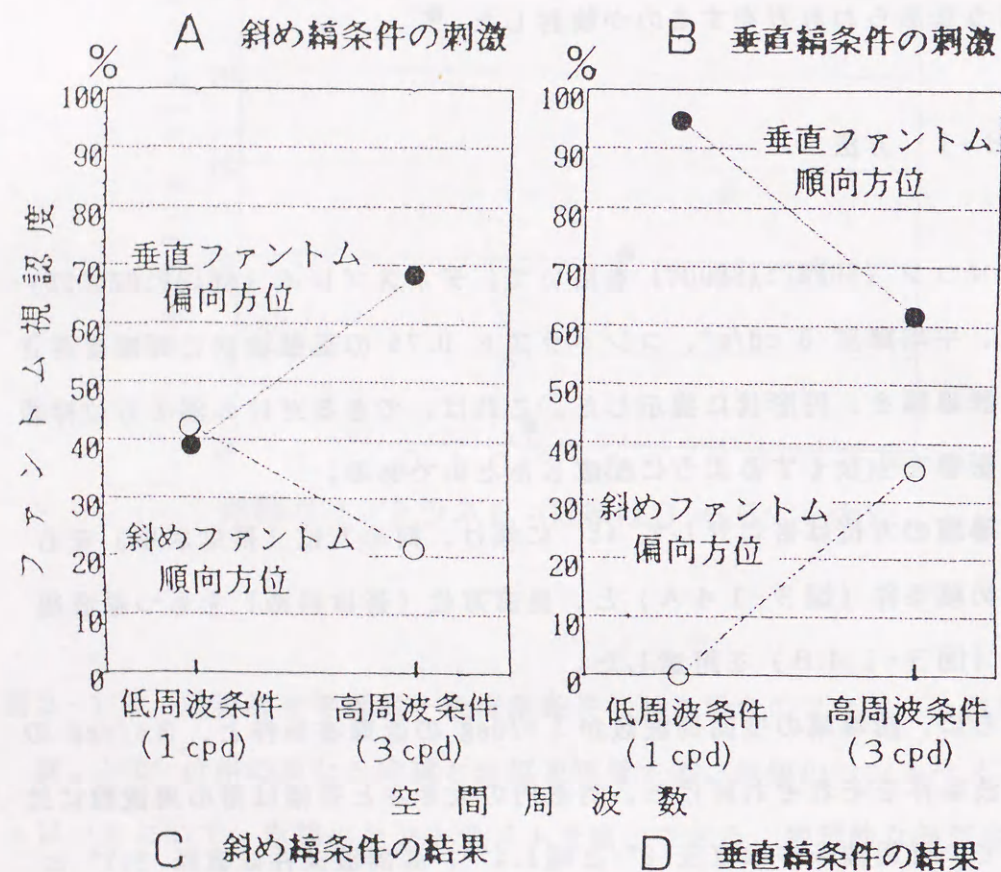
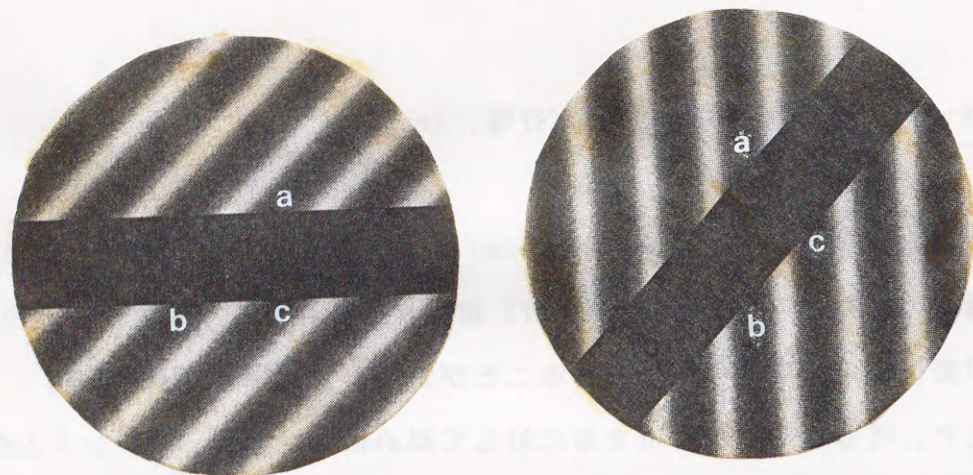


図3-14 フォントムの方位特性を調べるために用いた刺激条件 (A、B) と、それぞれの条件で得られたデータ (C、D)。両条件において、刺激のサイズを大小2種類にすることにより、低周波条件と高周波条件をさらに設けた。(行場, 1992 より)

が斜め縞条件に、半数が垂直縞条件に参加した。暗室中で、114 cm の距離をおいて帯の中央付近を両眼で凝視し、ファントムがいずれかの方位に見えている間、キーを押すよう求められた。低周波条件と高周波条件を相殺された順序で、それぞれにつき、30 sec ずつ、のべ 120 sec の観察を行い、キー押しの累積時間が生じたファントムの方位別に記録された。総観察時間に対するそれらの値の割合を算出して、ファントム視認度とした。

### 3-8-2 結果および考察

それぞれの条件につき、被験者のデータの中央値をとってプロットしたのが図3-14 C、図3-14 Dである。

まず、斜め縞条件のデータを検討する。図3-14 Cの斜めフォントムとは、図3-14 Aでaとbにあたる部分を連結するものであり、縞の傾きに対して、順向方位に生起するファントムである。垂直フォントムとは、aとcを連結するもので、縞に対して偏向方位に生起するファントムである。低周波条件のときには、両者はほぼ同等の強さであられるが、高周波条件のときには、偏向順方位である垂直フォントムが優勢になる。

次に、垂直縞条件であるが、図3-14 Dの斜めフォントムとは、図3-14 Bでaとcを連結するものである。この条件の場合、これが偏向方位のファントムとなる。垂直フォントムとは、aとbをつなぐものであり、これは順向方位のファントムである。低周波条件では、順向方位のファントムがきわめて優勢であるが、高周波条件では、偏向方位のファントムもある程度あらわれた。



以上の結果から、ファントムは、総じて垂直方位に出現しやすい傾向をもっていること、縞に対して順向方位に連結が起こるためには、縞の空間周波数が低くなければならないことがわかった。また、縞の空間周波数が高い場合には、連結距離が短かくてすむ方位にファントムが生じやすいことも示された。

## 4 空間周波数処理機構との

### 対応づけ

前章では、心理物理実験より得られたデータにもとづき、視覚的ファントムの特性を詳しく検討してきた。縞刺激を導入した利点の一つに、同様の刺激を使った数多くの研究との対件がとりやすいことがあげられる。そこで、本章では、Campbell & Robson (1964) の研究以来、かなり明確にされてきた視覚系の空間周波数処理機構と視覚的ファントムとの関連を検討してみよう。

#### 4-1 視覚チャンネルの特性との関連

視覚系の応答分析を縞刺激を用いて行った生理学および心理学的研究から、特性の異なる2つの視覚チャンネルの存在が指摘されてきた。刺激の立ち上がり、立ち下がりだけに敏感に応答する一過型チャンネル (transient channel) と、刺激の提示中、応答をつづける持続型チャンネル (sustained channel) である。まず、この2つの視覚チャンネルについての解説を行い、次に、特に一過型チャンネルの特性と視覚ファントムと対応づけを検討してみる。



#### 4-1-1 一過型チャンネルと持続型チャンネルの特性

Tolhurst (1975) によれば、空間周波数が 1 c/deg 以下の粗い縞刺激をかりうじて見えるぐらい低いコントラストで提示して検出反応時間を測定した場合、反応時間は迅速であるが、被験者が縞を検出できるのは刺激のオン・オフ時しかなく、その結果、提示時間を長くしても検出頻度は変わらないという。ところが、空間周波数を 3 c/deg ほどの細かな縞にすると反応時間は遅くなるが、刺激の提示中にも検出可能となり、検出頻度は提示時間が長くなるにつれて増える。このように、視覚系には刺激の立ち上がり、立ち下がりに一過的に应答する系と、刺激の提示中、持続的に应答する系があることがみいだされている。

また、縞刺激の検出の仕方についても次の2つの種類の閾値が存在することが知られている。一つはフリッカー閾とよばれ、縞のオン・オフだけがかろうじてわかる値である。もう一つはパターン閾とよばれ、縞刺激の実際の形状が知覚される値である。空間周波数が低い場合には、フリッカー閾はパターン閾よりもかなり低い値を示すが、高空間周波数領域では、両者の違いはなくなる (Kulikowski & Tolhurst, 1973)。

このような研究から、一過型チャンネルは空間周波数についてローパス的同調特性を、時間周波数に対してはバンドパス的同調特性を示し、反対に、持続型チャンネルは空間周波数についてバンドパス的特性を、時間周波数についてはローパス的特性を示すことが明らかにされている (図4-1)。

一般に、一過型チャンネルは運動やフリッカーなどの刺激変化の情報を粗く迅速に伝え、持続型チャンネルは刺激の形状を詳細に時間をかけて伝える機能を担うと考えられている (Breitmeyer & Ganz, 1976)。

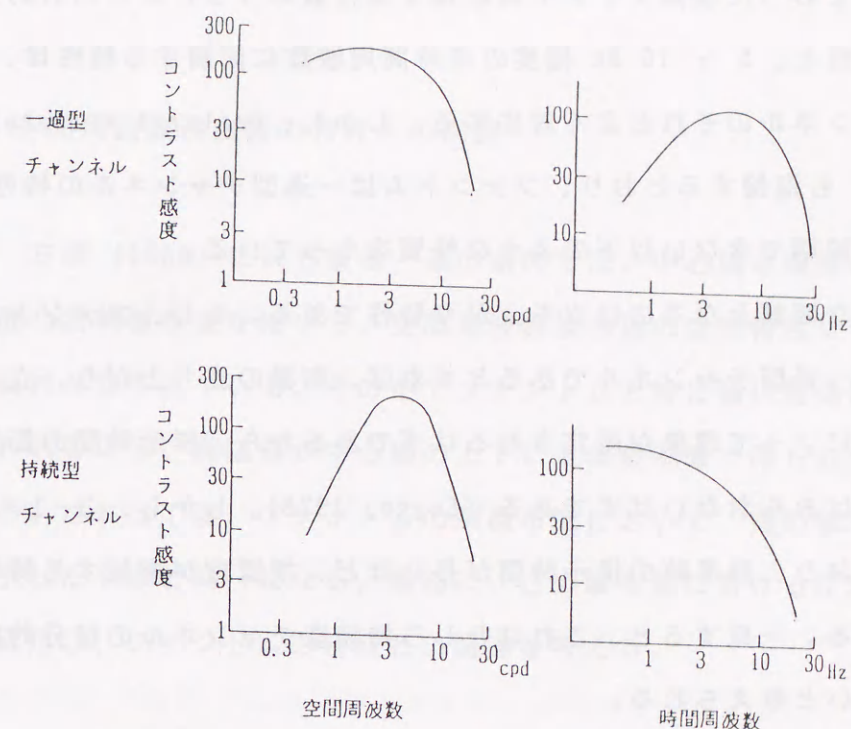


図4-1 一過型チャンネルと持続型チャンネルの空間・時間周波数同調曲線。一過型チャンネルの同調曲線は、フリッカー閾（縞刺激のオン・オフをかりうじて検出できる閾値）からコントラスト感度を求めたもので、持続型チャンネルのそれは、パターン閾（縞刺激の形状がかろうじて知覚できる閾値）から求めたものである。

(Kulikowski & Tolhurst, 1973 より、一部改変)



#### 4-1-2 一過型チャンネルの特性との関連

3章でのべた視覚ファントムの様々な性質のうち、ローパス的空間周波数特性と、5 ~ 10 Hz 程度の高時間周波数に同調する特性は、一過型チャンネルのそれとよく対応する。しかし、Genter & Weisstein (1981) も指摘するとおり、ファントムは一過型チャンネルの特性だけでは説明できない以下のような性質をもっている。

大きな問題となるのは立ち上がり特性である。もし、ファントムの担い手が一過型チャンネルであるとすれば、刺激の立ち上がり、立ち下がりのみによって現象が規定されるはずであるから、提示時間の影響は視認度にはみられないはずである (Legge, 1978)。しかし、3-1-2で示したとおり、誘導縞の提示時間が長いほど、視認度が増加する特性を示している。一見すると、これはむしろ持続型チャンネルの積分的応答特性に近いと考えられる。

また、Rosenbach (1902) や Genter & Weisstein (1981) も指摘するとおり、補間される部分にはある形が知覚され、単に運動やフリッカーだけが見えるのではない。これもこれまでに言及されてきた一過型チャンネルの特性だけでは説明つけにくい。

以上の事実は、視覚ファントムが一過型チャンネルと持続型チャンネルの両方の特性を合わせもつユニークな現象であることを示している (Gyoba, 1983)。

一過型チャンネルと持続型チャンネルの二分法は、ネコの網膜でみつけたY細胞とX細胞の特性が基盤となって提出されてきたが、最近、それらの特性を人間を含め、霊長類の視覚系にあてはめることの問題点

も指摘されている (7-4 参照)。また、立ち上がり特性については、ファントム特有のあたため期間の問題についてよく考慮することが必要であろう (6-2 参照)。

#### 4-2 空間周波数検出器の特性との関連

江島・三浦 (1982) にはじまる一連の研究では、中心縞の両側に周辺縞を並置した刺激布置を用いて、空間周波数検出器の空間特性について詳細な検討がなされている。その中でファントムと特に強い関連性があると思われるのは、周辺縞が中心縞の上下に並ぶ縦布置で得られたデータである。これは丁度、ファントムの刺激布置において、帯の領域にも縞を提示したものと同一になる。最初に、この縦布置における江島らの研究を紹介し、ファントムの特性との関連を考える。

##### 4-2-1 縦布置における空間周波数検出器の特性

Takahashi & Ejima (1985) は、中心縞と同相関係にある周辺縞のコントラストが 0.01 程度で低い場合、中心縞の検出感度が上昇すること、しかもその強さは周辺縞間の距離に依存し、縞の周期にして 10 サイクル分ほどの広がりをもつことをみだしている。周辺縞のコントラストが高い場合には感度の低下が生じ、その効果は 3 サイクル分ほどの広がりをもつという。また、逆相関係にある周辺縞では、コントラストが低い場合は感度の低下が生じ、高い場合にはほとんど影響がみられなかった。



Takahashi & Ejima (1985) は、周辺縞のコントラストが低い場合の感度の上昇および低下を、空間周波数と位相に選択性をもち、中心ならびに周辺縞に応答する検出器群の空間加重によりもたらされるとしている。コントラストの高い場合の感度の低下は、これらの検出器群の側抑制によるものとしているが、McCourt (1982) の縞誘導効果 (5 章参照) も同時に関与し、逆相条件では抑制効果を打ち消す働きをしていると考察した。

また、Ejima & Takahashi (1985a) は、中心縞の主観的コントラストにおよぼす周辺縞の影響も検討している。同相条件では、周辺縞のコントラストが中心縞のそれよりも低い場合には中心縞の主観的コントラストは上昇するが、逆の場合は低下し、一方、逆相条件では、周辺縞のコントラストが高くなるにつれて中心縞の主観的コントラストは単調に増加した。これらの結果も、空間周波数検出器間の空間加重、側抑制、および明るさ誘導の 3 つのプロセスを考慮すれば説明できるとしている

さらに、Ejima & Takahashi (1985b) は、コントラスト 0.5 の周辺縞に順応した後の中心縞の検出閾を調べたところ、周辺縞間の距離が縞の周期の 3 サイクル分以内では感度が低下したが、それ以後、10 サイクルまでは反対に感度の上昇が起こることをみいだした。このことから、空間周波数検出器が空間的に独立ではなく、周辺に広い抑制域をもって連結しており、その順応が抑制を解除する結果になると考察している。

#### 4-2-2 ファントムの特性との対応

周辺縞が中心縞の検出に影響をおよぼす範囲は、周辺縞間の距離をファントムの刺激布置でいう帯の幅にあてはめて考えれば、ファントムの

臨界空間周波数のデータにかなりよく対応する。

しかし、江島らの研究との対応を取る際の問題点として、まず、ファントムの刺激布置では、誘導縞には含まれる領域 (つまり帯) は等質輝度にしてあるため、誘導縞との位相関係を刺激条件として云々することができないことがあげられる。

また、江島らのデータはすべて中心縞と周辺縞の平均輝度が同じ条件で測定されたものであることに注意しなければならない。もし、ファントム刺激布置のようにそれらの間にかかなりの差がある場合、想定された空間周波数検出器間の空間加重および側抑制のかかり方はどのように変化するのか、明らかにされてはいない。

さらに、江島らの研究で用いられた周辺縞の平均輝度は  $100 \text{ cd/m}^2$  とかなり高く、ファントムの最適生起条件 (3-6 参照) からははずれた値である点も大きな問題である。

いずれにせよ、ファントムを生起する誘導縞の多くは、Takahashi & Ejima (1985) および Ejima & Takahashi (1985a) の報告からすると、もっぱら抑制効果をもつはずの高いコントラストのものである。したがって、空間周波数検出器の空間特性に関するこれまでに明らかにされているデータだけからファントム現象の説明することは困難である。



## 5 縞誘導効果との相違

McCourt (1982) は、ファントムと同一の刺激布置を用いて、空間周波数に依存する新しいタイプの明るさ誘導効果を報告している。静止縞の中央部分を水平に二分するテストフィールド（ファントムの用語でいえば帯にあたる）を設け、その輝度を縞の平均輝度付近に設定すると、テストフィールド上に上下の縞と逆の位相をもつ縞が誘導されてみえる現象で（図3-7 b 参照）、縞誘導効果（grating induction effect）と名づけられた。

この章では、はじめに縞誘導効果の特性を検討し、次に、視覚的ファントムと連続性をもつ現象かどうか考察する。

### 5-1 縞誘導効果の特性

McCourt (1982) は、相殺法（cancellation technique）により、テストフィールドにも誘導された縞を打ち消すように輝度変調をかけ、その振幅を求めて誘導強度とした。誘導強度は縞の空間周波数が高くなるにつれて減衰するローパス的特性を示した。また、テストフィールドの高さ（ファントムの用語で言えば帯幅にあたる）が大きくなるほど、低い空間周波数で誘導効果は消失するデータを得ている。さらに、矩形波誘導縞を用いると、誘導強度は小さくなるが、空間周波数が高くなると



正弦波誘導縞の場合との違いはなくなることをみいだしている。

Foley & McCourt (1985) は、種々のタイプの受容野特性に似せた空間的重みづけ関数を縞誘導効果を生じる刺激布置についてたみ込み積分を行ったところ、ネコの視覚野で発見された超複雑型細胞の受容野のように、中心に細長く狭い興奮野および抑制野をもち、その両端に広い抑制域をもつタイプのものが最もよく測定データと適合することを示し、縞誘導効果がこれらの細胞間の相互抑制の結果、生じると考察している。この考え方は、空間周波数検出器に検出にかかわる中心領域とそれを抑制する周辺領域を想定する江島らの見解（4-2 参照）と共通点がある。

Foley & McCourt (1985) の提出したモデルでは、テストフィールドの輝度の影響について定量的な予測はなされていないが、テストフィールドの誘導縞に対する輝度比と誘導される逆相の縞の強さとの間の関数が測定されている。それによると、テストフィールドの輝度が誘導縞のそれよりも低く、あるいは高くなるにつれて逆相縞の強度は減少するデータが得られている。しかし、測定されたデータの範囲内では同相の縞が誘導されるまでにはいたっていない。

最近、McCourt (1990) は、誘導縞の平均輝度を  $0.3 \sim 0.5$  phot td. 程度に低くすると、縞誘導効果が消失することを示し、この現象が明所視条件で生起するものであることを示している。

## 5-2 両現象の連続性

McCourt (1982) は、ファントムが運動縞を使って報告されていたことなどから、縞誘導効果とファントムを別個のものとして扱い、両者の

関係を検討するようなことはしなかった。しかし、Gyoba (1983) による静止ファントムの発見は、空間周波数特性や誘導縞の波形の要因など、両者の類似点を強調するものであった。さらに、Sakurai & Gyoba (1985) の研究は、帯（テストフィールド）の輝度を変数にとれば、それが誘導縞の明暗ピーク付近にあるときにはファントムが、平均輝度付近では縞誘導効果が生じることを示し、両者が連続線上に並ぶことを示唆した。

Foley & McCourt (1985) は、Gyoba (1983) の指摘に答えて、縞誘導効果に関する彼らのモデルとファントムとの関連についても言及している。それによると、超複雑型のような受容野特性をもつ細胞の相互抑制には時間的遅れがあり、その結果、誘導縞が運動している場合やテストフィールドが暗い場合には、これらの細胞の一過的興奮や、興奮と抑制のアンバランスが生じてファントムが生起する可能性があるという。

## 5-3 両現象の相違点

それでは、ファントムと縞誘導効果とは同一現象の別側面であるのだろうか。上述したように共通点は数多くあるけれども、両者を同一の現象と認めるわけにはいかない。それは、以下のような相違点があるからである。

### 5-3-1 誘導縞の平均輝度の違い

これまで用いられてきたファントムの誘導縞の平均輝度は  $10 \text{ cd/m}^2$



程度と低く、Rosenbach (1902) も指摘するとおり、ファントムは薄暮視、暗所視レベルで生じる現象であることを示している (3-6 参照)。

一方、縞誘導効果は明所視レベルの現象であり、誘導縞の平均輝度を低くすると消失してしまう (McCourt, 1990)。

#### 5-3-2 帯幅の影響の違い

次に、帯幅の影響の違いがあげられる。縞誘導効果では、テストフィールドが視角  $0.1^\circ$  ほどに狭くなっても、その幅が小さくなればなるほど誘導効果の強度は増大してゆく (McCourt, 1982)。

一方、ファントムは、臨界周波数を越えない範囲ではその視認度は安定し、帯幅の影響を受けにくい非線形的な性質を示す (3-5 参照)。

両現象の強度の測定法には違いがあるものの、これらのデータは、帯幅の要因について両現象は異なった特性をもっていることを示している。

#### 5-3-3 あたため期間の必要性の違い

縞誘導効果の立ち上がり特性については、実験データは提出されていないが、現象観察からすると、誘導縞が提示されるとただちにその効果が観察されるので、立ち上がりは迅速とみられる。

一方、ファントムは、誘導縞の提示後、ただちに知覚されるわけではなく、誘導縞をある一定時間見つめているとあらわれてくる。この待機時間は、あたため期間と名づけられ (Tynan & Sekuler, 1975)、特に、誘導縞の空間周波数が高くなるほど、それが長くなるデータが得られている (3-3 参照)。

#### 5-3-4 知覚的安定性の違い

縞誘導効果は、従来の明るさ対比現象と同様に、きわめて安定して知覚される。しかし、ファントムの見えは不安定であり、観察中、出現と消失を繰り返す (2-4-3 参照)。

安定性が異なることは、知覚現象としての強弱に両者の相違があるというよりも、生起メカニズム自体に違いがあることを示唆していると考えられる (8 章参照)。

#### 5-3-5 誘導された縞の見え方の違い

縞誘導効果で観察される逆相の縞はきれいな正弦波状に見えるのに対し、ファントムでは同相の縞が知覚されるといっても、帯の輝度に応じて縞の暗い、あるいは明るい部分に対応する箇所のみが強調された歪んだ波形が見える (3-4 参照)。このことが、縞誘導効果で用いられた相殺法 (5-1 参照) と同様な測定法をファントムにも適用することを困難にしているのだが、とにかく、誘導された縞の形状の違いも重要な相違点であろう。

#### 5-3-6 誘導現象の可塑性の違い

視覚的ファントムはもともと、運動するランダムドットを誘導刺激としてみいだされたものであり、そのときには運動するドットが誘導されて知覚される (Tynan & Sekuler, 1975)。また、Rosenbach (1902) や



Weisstein & Maguire (1978) の研究が示したように、誘導刺激がある形態をもつ場合、補間される領域にもそれに対応した形態が知覚される。さらに、Weisstein et al. (1982) は、帯が誘導縞の前面に浮きでてみえるように両眼視差で奥行をつけると、ファントムの見えが有意に悪くなることをみいだしている。このような可塑的特性は、縞誘導効果では報告されていない。

#### 5-4 縞誘導効果との関連についての結論

視覚的ファントムと縞誘導効果は、同一の刺激布置を用いて観察される誘導現象であることから、同一のメカニズムにもとづくのではないかとその予想を立てるのは自然なことと思われる。

しかし、詳細に検討すると、上述したような種々の相違点が明確になり、両者を連続線上にある現象と認めるわけにはゆかない。とりわけ、5-3-1でのべたように、視覚的ファントムが薄暮視、あるいは暗所視状態で生起する現象であるのに対し、縞誘導効果が明所視レベルの現象である相違点は重要であり、両現象の背後には別個のメカニズムがあると想定したほうが妥当であると結論される(8章参照)。

## 6 関連する視覚的補間現象

前章では、視覚的ファントムと直接的な関連性をもつ研究との対応を検討してきたが、本章では視野を広めて、第1章で整理分類した種々の視覚的補間現象のうち、特に空間的補間に含まれるものとの関連性を追求してみよう。これにより、ファントムをより広いコンテキストで理解することができるし、また、視覚的補間一般のより深い理解にもつながると期待される。

### 6-1 重なりの知覚との関連性

視覚的ファントムは、空間的補間に分類される補間現象であるが、その中で特に関連性が深いと思われるのは、重なりの知覚である。ファントムの刺激布置における誘導縞と帯の関係には重なりの知覚が含まれている。はじめは縞の上に帯が重なっている見えるが、ファントムが発生すると、それが逆転して、帯の上に縞が重なるように知覚される。

重なりの知覚では、遮蔽されている領域が、実際に見えていなくても、遮蔽する領域の背後まで広がって存在して知覚される。このような視覚的補間が最も端的にあらわれるのは「地 (ground)」の知覚である。例えば、テーブルにおかれた皿があるとすると、皿で隠されたところに穴があいたように見えることはない。そこで、まず「地」の知覚の特性を



分析し、ファントムとの関連性を追求してみよう。

次に、重なる知覚では、同一領域に複数の対象面の存在が知覚されるが、この問題についても考察を深めることにする。

#### 6-1-1 「地」の知覚の特性

最近の研究から、「地」として知覚されやすいのは低い空間周波数と高い時間周波数、そして垂直・水平方位成分をもつ領域であることが明らかにされてきた (Weisstein & Wong, 1986; 行場 1991c 参照)。これらの特性は、3章で検討したファントムのものと類似しており、きわめて興味深い。以下、「地」の知覚についてみいだされた特性をのべる。

##### 6-1-1-a 空間・時間周波数特性

図6-1には、杯の領域に空間周波数の高い縞を、顔の領域には周波数が  $1/4$  の太い縞をつけた Rubin 図形が示してある。この場合、普通の Rubin 図形とは違って反転することは少なく、杯のほうがより長い時間、優勢に見える。縞のつけ方を反対にすると、今度は顔のほうが優勢になる。つまり、空間周波数が低い領域ほど「地」になりやすいのであり、その傾向は周波数の違いが領域間で大きいほど強まる。例えば  $0.5 \text{ c/deg}$  と  $8 \text{ c/deg}$  の縞のついた領域では、前者が「地」になる時間の割合は  $70 \sim 95 \%$  に達するという (Klymenko & Weisstein, 1986)。

次に時間周波数特性であるが、ドットを一様にちりばめた画面で、顔にあたる領域を杯にあたる領域よりも明るくしたり、暗くしたりして明滅 (フリッカー) させる。そうすると明滅している領域が「地」に、していない領域が「図」に見える。フリッカーによる「地」の知覚がもつ

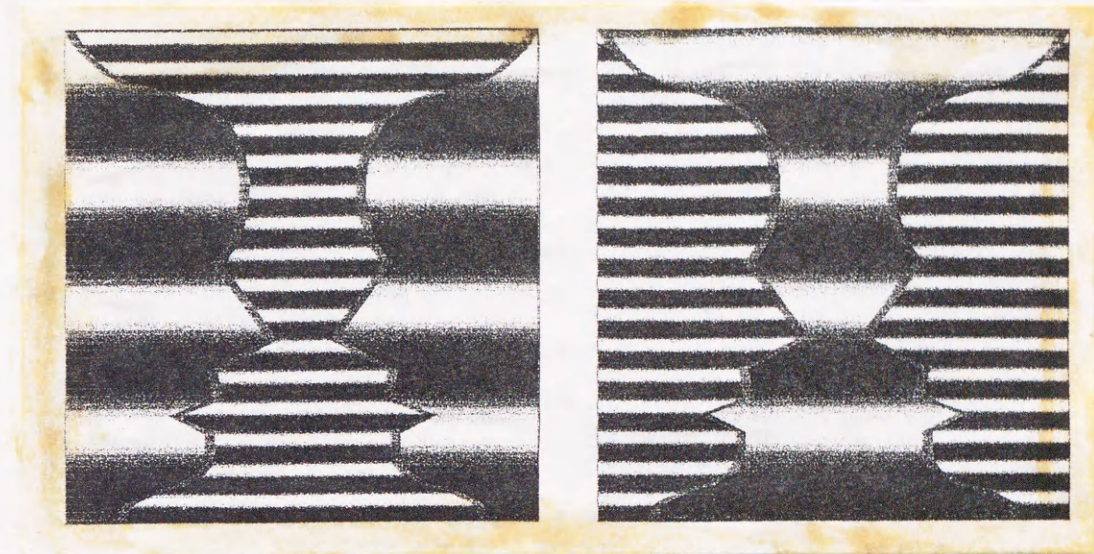


図6-1 「地」の知覚にあらわれる空間周波数特性。Rubin 図形の顔と杯の領域に空間周波数が4倍異なる縞をつけると、いつもの Rubin 図形とはちがって反転は少なく、低い空間周波数をもつ領域が「地」に、高い周波数をもつ領域が「図」に知覚されやすい。  
(Klymenko & Weisstein, 1986 より、一部改変)



とも強くあらわれるのは、時間周波数が 6 ～ 8 Hz のときであることがわかっている (Wong & Weisstein, 1987)。

#### 6-1-1-b コントラストおよび色度特性

領域の分離ならわずかな輝度差があればできるが、領域の輝度が等しく、色度のみ異なるときに図地分化が困難になることは、Liebmann 効果として知られている (Liebmann, 1927)。Rubin 図形を等輝度・色度差条件で提示すると、反転の頻度が非常に高まり、しばしば顔も杯も同時に知覚されることが報告されている (Livingstone & Hubel, 1988)。このように、両領域とも「図」として知覚されやすいことは、等輝度条件ではとくに「地」の知覚が阻害される可能性があると考えられる (行場, 1991c)。

#### 6-1-1-c 方位特性

図 6-2 では、人の顔と杯の領域に、空間周波数は同じにして、方位の異なる縞模様をつけてある (行場, 1990)。この場合、通常の Rubin 図形とは異なって、図地反転の頻度は小さく、垂直方位の縞をもつ領域が「地」に、斜め方位の縞をもつ領域が「図」になりやすいことがわかるであろう。行場 (1990) のデータによると、このような効果が最大にあらわれるのは、垂直縞とそれから 30° 斜めの縞であり、垂直縞の領域は観察時間の 80 % 近くが「地」に見えるという。

シマウマをはじめ、縞模様を使ってカムフラージュをする動物は多いが、その縞の方位は垂直か水平である場合が多く、斜め縞がついているのは体のほんの一部である。一方、危険を表す標識の黒と黄色の縞模様や、理髪店のボールの模様、およびネクタイの柄などでは斜め方位が用

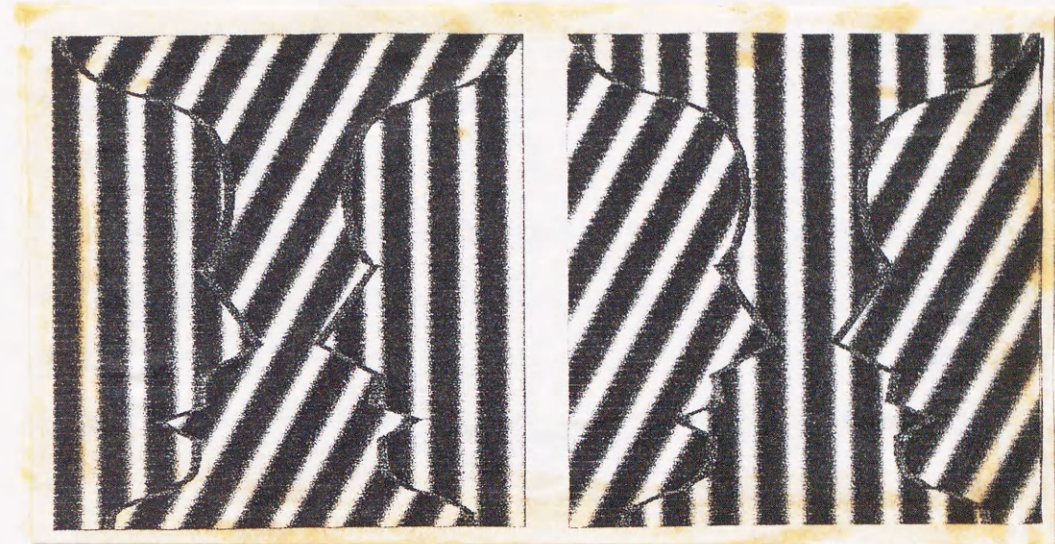


図 6-2 縞の方位を垂直と、30° 斜め方位にした場合には、垂直方位をもつ領域が「地」に知覚されやすい。ただし、方位の効果は、縞の空間周波数が低い場合には弱い。この図を遠ざけたり、近づけたりして見ると、効果が増減することがわかる。(行場, 1991 より)



いられている。これらの例も、カムフラージュをするなら「地」とな  
て目立たない垂直・水平方位が、「図」として注意を引くためなら斜め  
方位が適していることを示しているのであろう。

#### 6-1-1-d ファントムと共通性

これまでのべてきたように、「地」の知覚とファントムとは、その空  
間・時間周波数特性、コントラスト・色度特性、方位特性ともよく一致  
することが明らかにされた。両者には見えない補間、見える補間の差異  
はあるものの、背後には共通性があることが予想される。

最近、Brown & Weisstein (1991) は、誘導図形に重なりの手掛かり  
による奥行きをつけると、前面に位置するように配置した誘導図形がフ  
アントムを生じやすいことを理由に、ファントムはその領域がどれくら  
い「図」になりやすいかに依存して発生するとしている。しかしこの主  
張にはいくつかの問題がある。

まず、ファントムの空間・時間周波数特性は、Weisstein らがみずか  
ら調べた「図」の知覚のそれらとは対応せず、むしろ「地」の特性と一  
致していることがあげられる(6-1-1-a参照)。次に、Brown &  
Weisstein (1991) が用いた誘導図形は縞刺激ではなく、広がりをもた  
ない線画図形なので、図地関係を議論するには問題があるといえる。

Brown & Weisstein (1991) の研究は、ファントムが「図」の知覚に  
対応するというよりも、誘導図形の奥行きがファントムの見えにおよぼ  
す影響を調べたものとみなすことができ、この点は重要な示唆を含んで  
いるので、後で詳しく議論することにする(6-2-1参照)。

#### 6-1-2 二重表現

「地」の知覚に端的にあらわれるように、重なり知覚には刺激の同  
一領域に複数の対象面の存在が認められる。図6-3 aでは、縞模様が  
「地」となって立方体の背後まで広がって見える。このように、刺激の  
同一領域に「図」と「地」の両方が存在するように印象づけられる事実  
を Koffka (1935) は二重表現(double representation)とよんだ。

二重表現に関して、Weisstein (1970) は興味深い実験を行っている。  
図6-3 aでは二重表現が強く感じられるが、図6-3 bではそのような  
知覚印象は弱い。これらの刺激を数十秒間注視したあとに、「地」の領  
域と同じ縞模様のターゲット(図6-3 c)を中央部分に短時間提示し、  
被験者にそれがどれぐらいはっきりみえたか評定してもらった。その結  
果、aではbにくらべてその明瞭さ評定値が有意に低くなることがわか  
った。これは、「図」の背後に「地」が広がる知覚印象に応じて、「地」  
の縞模様に対する順応と同じ過程が「図」の領域でも進行していたこと  
を示している。

Gyoba (1979) は、立方体のかわりに両眼視差によって奥行きをつ  
けた長方形(図6-4)を用いて実験を行った。ここでも奥行き関係は決  
定的な要因であり、長方形が縞模様の前面に浮きでて知覚されたときには  
順応効果が生じ、縞模様と同一面あるいは後面に知覚されたときには  
そのような順応効果はみられないことを確かめた(図6-5)。

また、ファントムによっても、実際に縞が存在しない領域に順応効果  
が生じる事実が報告されている(Weisstein & Maguire, 1982)。したが  
って、もし順応という指標をとれば、重なり知覚でも、ファントムで  
も、同一の効果をもっているということになる。このことは視覚系の同



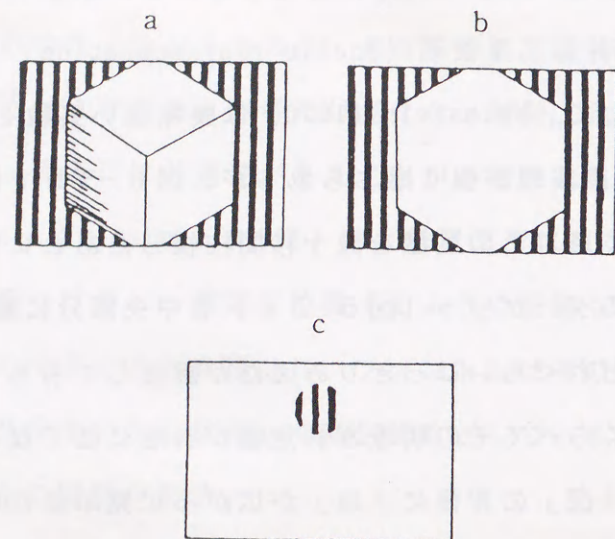


図6-3 二重表現の実在性を示す視覚実験。aでは立方体の背後まで縞模様が広がる印象がえられるが、bでは六角形の穴があいているように見える。これらの刺激を数十秒凝視した後に、ターゲット刺激cを短時間提示すると、その見えの明瞭度はbよりもaを観察した後のほうが悪くなるという。(Weisstein, et al., 1972 より)

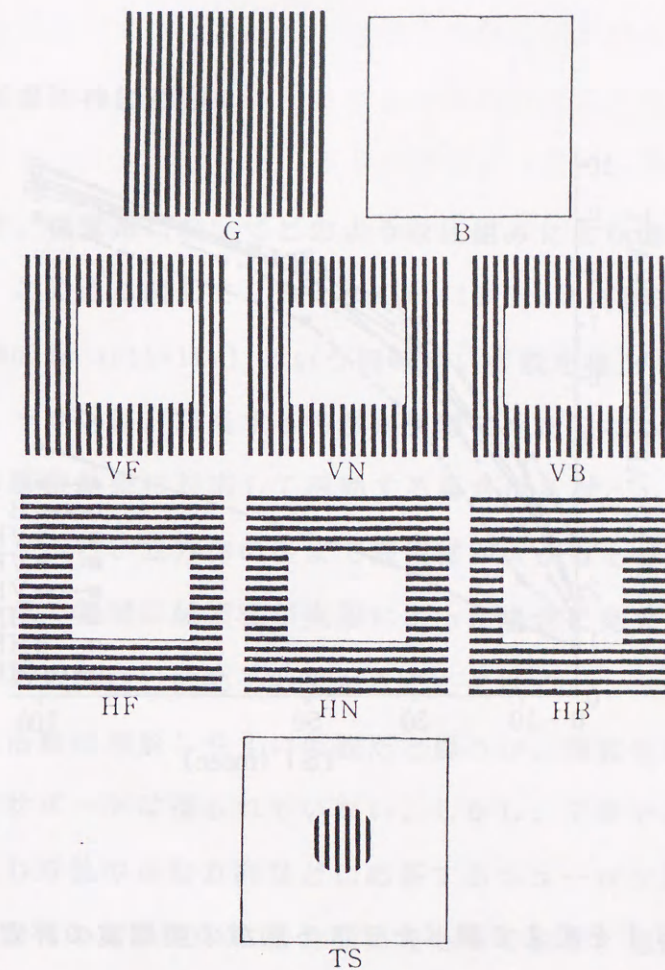


図6-4 両眼視差で奥行きをつけ、二重表現の実在性を調べる実験で用いた刺激。左眼に提示する刺激のみ載せてある。上から3段目までは順応刺激であり、VFおよびHFでは縞模様の前面に白い長方形が浮き出て見えるが、他の刺激ではそのような見え方はしない。4段目はテスト刺激である。(行場, 1979 より)



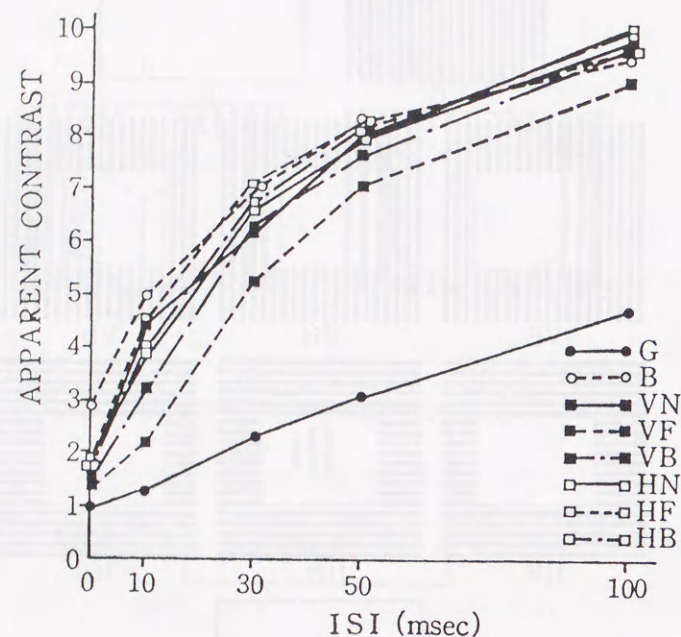


図6-5 ISIを変えて調べたテスト刺激の明瞭度の評定値。全領域に縞模様が存在するG条件を除くと、VF条件のみが他の条件とは異なっており、統計的に有意にテスト刺激の見えが低下することが確認された。長方形の背後に縞模様が広がる知覚内容に応じて、それに対する順応が生じていたことがわかる。しかも、HF条件との差から、二重表現による順応効果にも方位選択性があることが示された。(行場, 1979 より)

一のシステムが両者に関与している可能性を示している。大きな違いは、前者では補間された領域が実際に見えないのに対し、後者では見えることであるが、6-2ではこのことをさらに考察してみる。

### 6-1-3 表象的神経活動

二重表現は、視覚系においてどのような仕組みにより達成されているのだろうか。この点に関して、Weisstein (1970) は表象的神経活動 (neural symbolic activity) という興味深い仮説を提出した。特徴抽出を行うニューロンは、該当する特徴が実際に存在しないときでも、視覚情報全体の解釈結果に対応して活動する場合があるというのである。この仮説からすると、立方体の後まで縞模様が広がっていると知覚されているとき、その領域に縞模様が実際にあった場合に発火するであろうニューロンがある程度の活動をしていたことになる。

表象的神経活動は理解しやすい仮説だと思うが、視覚生理学的にはその後の明確なサポートは得られていない。しかし、7章でのべるように、視覚野では同じ方位や運動方向などに応答するニューロンはその受容野の位置がはなれていても互いに結合関係をもっており、協応的応答をする可能性があるとするれば、再考に値する仮説だといえる。

### 6-2 感性的補間と非感性的補間の差異

補間された部分が見える感性的補間と、見えない非感性的補間があることは1章でのべた。そして、視覚ファントムは前者に、重なり



の知覚、特に「地」の知覚は後者に属するが、両者には多くの共通点があることが明らかにされた。このことから、感性的補間と非感性的補間には、いわば紙一重の違いしかなく、両者の背後には共通のメカニズムがあるのではとの推測が成り立つ。

感性的補間と非感性的補間の差異を作り出す決定因として注目したいのは、視覚環境に内在する制約である。以下に考察するように、視覚的ファントムは、この問題に取り組む良い足掛かりを提供してくれる。

#### 6-2-1 奥行き関係の制約

Gibson (1979) が明らかにしたように、視覚環境は数々の制約をもつ強い構造的性を有している。その一つに、隠蔽する領域は、隠蔽される領域の前方に位置する奥行き関係を必ずもつことがあげられる。そして、隠蔽によって生じる輪郭は前方に位置する領域に所属し、後方に位置する領域には所属しないという制約がある (Nakayama et al., 1989)。ある領域が見えるためにはそれが他の領域に隠蔽されることなく、最前面に位置づけられなくてはならない。この制約に従った視覚処理が可能になるかどうかで見えない補間になるか、見える補間になるかがきまると考えられる。

いうまでもなく、「地」の領域は「図」の領域の後面に知覚される。したがって、上述した制約により、非感性的補間が生じている。

一方、ファントムは、縞は帯で遮蔽されていたはずなのに、帯の前面でつながって見える。ファントムを生み出す刺激事態では、帯の奥行きを決定する手掛かりが比較的弱いので、はじめ縞の前面にみえていた帯が後面に位置づけられ、奥行き関係の反転が起こるのではないだろうか。

そしてこのような奥行き反転が可能になったとき、奥行き関係の制約がとけ、ファントムがあらわれるのではないだろうか (奥行き反転が可能になる理由については、6-2-2 および8章で考察する)。

この考え方を裏づける実験はすでになされている。帯が縞の前面に位置するように両眼視差で明確な奥行きをつければ反転は起こらないが、そのような事態では実際にファントムが生じにくいことが報告されている (Weisstein et al., 1982)。また、誘導図形のうち、前面に位置するものほどファントムを発生させやすいデータも得られている (Brown & Weisstein, 1991)。ファントムが見えてくるまでに必要とされる「あたため期間」も、この奥行き関係の反転に要する時間に対応していると考えられる。

奥行き関係の制約により、感性的補間になるか、非感性的補間になるかが決まるとする考え方は、最近、Kellman & Shipley (1991) も提出している。このことを端的に示すデモとして、彼らは自発的分割図形 (spontaneously splitting figure) を考案した (図6-6)。2つの図形の交差領域には、どちらの図形が上に知覚されるかによって、それに対応した主観的輪郭が知覚される。つまり、奥行きがどのように知覚されるかに依存して、感性的補間と非感性的補間が交替するのである。上述したように、視覚的ファントムを生む刺激布置もある種の自発的分割図形といえよう。

#### 6-2-2 T型接点の手掛かり

奥行き知覚の手掛かりには両眼視差をはじめいくつか有効なものがあるが、単眼視条件においても強力にはたらく手掛かりとしてT型接点が



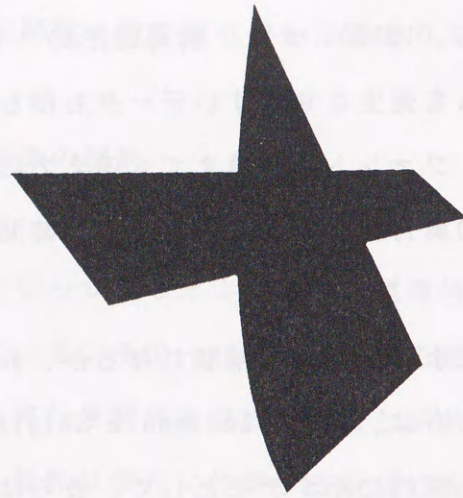


図6-6 Kellman らの考案した自発的分割図形 (SSF, Spontaneously Splitting Figure)。2つの図形の交差領域には、上面に知覚された図形に対応した主観的輪郭が知覚されるが、それには自発的交替がおこる。(Kellman & Shipley, 1991 より)

あげられる。T型接点には、連続した方位をもつエッジと、端点（エンドポイント）をもつエッジが存在するが、前者は前面に位置し、後者は後面に位置づけられる（図6-7 a参照）。6-2-1でのべた奥行き関係の制約と連結させて考えれば、前者は見える輪郭となり、後者の延長は見えない輪郭となる。

T型接点は、古くから重なり知覚の手掛かりとして重視されてきた (Ratoosh, 1949; 行場・丸山, 1978 参照)。これに対し、Chapanis & McCleary (1953) は、接点の手掛かりよりも全体的な形態関係のほうがより重要な要因になるとして、図6-7 bのような反証を示したことがあった。しかし、これは輪郭をどの程度の解像度でとらえるかの問題であり、解像度を下げ（ぎざぎざを取り除いて）、輪郭を定義した場合には、依前としてT型接点が存在することには変わりはない。T型接点は、Waltz (1975) に代表されるコンピュータビジョン研究でも、面の関係を解析する重要な手掛かりとして利用されている。

視覚ファントムの刺激布置について、T型接点の問題を検討してみよう。視覚系のエッジ検出の理論 (Watt, 1988) からすると、正弦波状に輝度変調された誘導縞において、エッジが立つ位置は、輝度が最大値あるいは最小値をもつ箇所、つまり黒縞あるいは白縞の稜である。この稜と帯の間にはT型接点が存在するので、通常は帯が前面に位置づけられ、非感性的補間が生じている。ところが、帯の輝度レベルによっては、黒縞か白縞いずれか一方の稜のT型接点はエッジの輝度差が小さく、感受されにくくなる場合があると予想される。T型接点が感受されなければ、縞が帯の前面に位置づけられる可能性が生じ、奥行き関係の制約が解除され、感性的補間であるファントムが発生すると考えられる。この点についてはより詳しく8章で考察する。



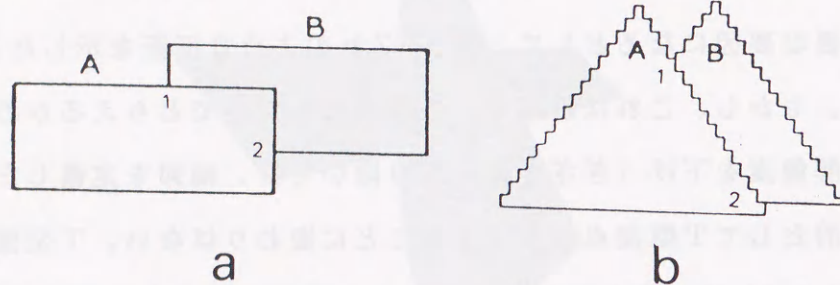


図6-7 重なる知覚の手掛かりT型接点。a : T型接点1および2で連続した方位をもつエッジは前面に位置づけられる。b : Chapanis & McCleary はT型接点よりも全体的な形態が重要な手掛かりであると主張して提出した反証。しかし、これはどの程度の解像度で画像をとらえるかの問題であり、解像度をさげて輪郭をとらえた場合には、依然としてT型接点が存在するといえる。  
(Chapanis & McCleary, 1953 より、一部改変)

### 6-3 主観的輪郭との関連

輪郭は通常、明るさや色の変化に急激な勾配がある場所に生まれるものであるが、全く等質な領域にもそれが知覚される場合がある(図6-8参照)。これが主観的輪郭とよばれるもので、Kanizsa (1976) が多様な範例を提出した。

図6-8をみてもわかるとおり、主観的輪郭で囲まれる領域は、ポップアウトする(前面に飛び出すように見える)ように知覚され、周囲よりも明るく(A)、あるいは暗くあらわれ(B)、あたかも不透明な面が刺激の一部を覆い隠しているように知覚される。

主観的輪郭の生起メカニズムについては数多くの理論が提出されているが、20年以上にわたる検討を経ても、この現象を統一的に矛盾なく説明できる理論はいまだに提出されていない。主観的輪郭に関する理論は、一般に、視覚情報処理の低次のレベルで発生するとする「生理説」と、問題解決のような比較的高次の処理水準で生起するとする「認知説」に大別されている。前者には、明るさ対比説 (Brigner & Gallagher, 1974)、輪郭線検出器の部分的賦活説 (Stadler & Dieker, 1972) などがあり、後者には、奥行き処理説 (Coren, 1972) や認知的仮説構成説 (Rock & Anson, 1979) などがあげられている(行場・丸山、1978; Petry & Meyer, 1987; 渡辺・永瀬、1989 参照)。

本論では、ファントムとの共通点や相違点を分析に重点をおいて、主観的輪郭の考察を行う。また、同時にファントムの特性についても、それとの対比から理解を深めることにする。



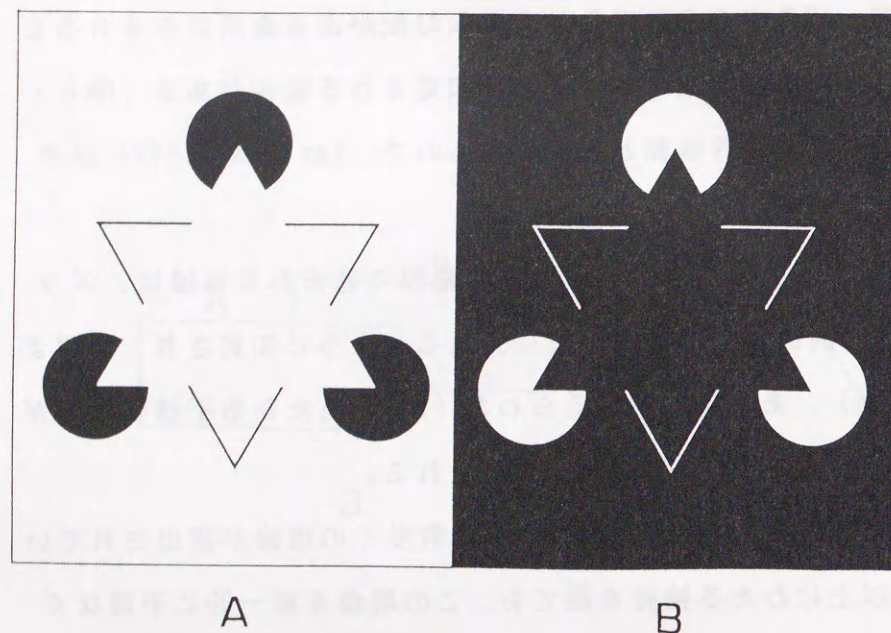


図6-8 主観的輪郭の代表例である Kanizsa の三角形。

(Kanizsa, 1976 より)

### 6-3-1 両現象の共通点

まず、視覚的補間現象として主観的輪郭もファントムも空間的補間であり、感性的補間に所属する。特に、両者とも静止した刺激パターンにより誘導される現象であることは、共通点として注目される。

また、両現象では補間される領域の奥行きが前面に位置づけられており、6-2でのべたとおり、感性的補間が成立する制約が守られている。

ファントムが知覚されるためには、誘導縞に輝度差が必要であることは3-4でのべたが、主観的輪郭も誘導図形が等輝度で色度差のみで描かれていると、弱くなるか、消失することが報告されている (Frisby & Clatworthy, 1975; Livingstone & Hubel, 1987)。

### 6-3-2 両現象の相違点

上述したように、主観的輪郭とファントムは、補間現象としては同じように分類されるが、両者にはその成立メカニズムの違いを示唆する重要ないくつかの違いがみられる。

まず、最初に空間周波数に対する偏好性の違いがあげられる。3-3でのべたように、ファントムは誘導縞の空間周波数が低い場合にのみ生起し、ファントムの見えもくっきりとした輪郭をとまなわないぼやけたものであり、低空間周波領域の現象といえる。これに対し、主観的輪郭の見えはシャープであり、それ自身が高い空間周波成分に近い見え方をする。主観的輪郭は高空間周波領域にわたる現象といえよう。この点に関し、Ginsburg (1975) は、誘導図形から高周波成分をカットし、低周



波成分のみを残すと、主観的輪郭に対応する図形があらわれることを根拠に、視覚系の低空間周波数フィルターリングにより主観的輪郭が知覚されると主張したことがあった。しかし、この説からは、主観的輪郭のシャープな見えが説明できない。また、低空間周波数フィルターリングを施しても、主観的輪郭に対応する図形が得られない例も報告されている (Parks & Pendergrass, 1982)。

次にあげられる重要な点は、コントラストと輝度レベルの違いである。ファントムの視認度は誘導線のコントラストが低いところで飽和してしまう (3-5 参照)。また、ファントムが生起するのは誘導線や周囲照明の輝度が薄暮視か、暗所視レベルの低い状態にあるときである (3-6 参照)。一方、主観的輪郭は誘導図形のコントラストが高く、周囲照明の輝度が高いほど明瞭に生じ、明るさ対比説の根拠にもなっている。

また、現象の知覚的安定性という点についても違いがみられる。ファントムは知覚されるまでにある長さのあたため期間が必要であり、しかも、観察中、消失と出現をくりかえす不安定な見え方をする。これに対し、主観的輪郭の見えは安定しており、そのような動揺は認められない。

両現象の相違点を考察するときに興味深い情報をもたらしてくれるのは、Kanizsa (1976) や Ware (1981) があげた図 6-9 に示す主観的輪郭の例である。この例では、誘導線分の端点がみいだされ、そこから誘導線分にほぼ直交する方位に主観的輪郭線が知覚されている。このように、主観的輪郭では誘導図形の端点が検出され、誘導図形の方位に直交する補間がなされることがわかる。一方、ファントムでは、3-8 で方位特性を検討したように、誘導図形に一致した方位や、垂直方位になされる補間が優勢である。また、そこでなされる補間では、端点は知覚されていない。つまり、主観的輪郭は端点を検出した上での補間であり、

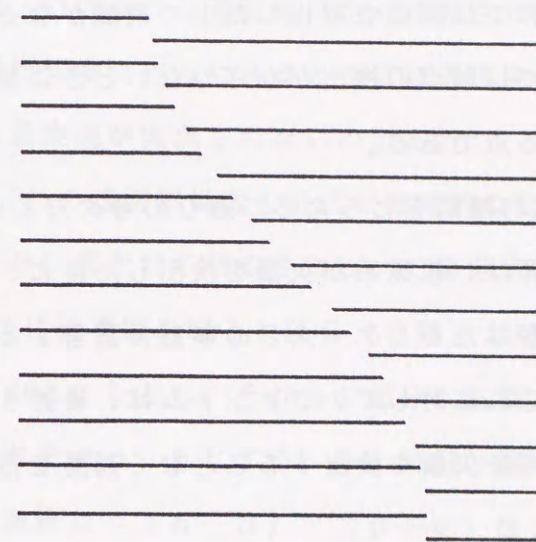


図 6-9 誘導線分の端点をとおり、誘導線分にほぼ直交する方位にのびる主観的輪郭線。(Kanizsa, 1976 より)



一方、ファントムは端点を検出しない補間とみられるのである。

### 6-3-3 両現象の関連のまとめ

上述したように、両現象にはいくつかの共通点があるが、成立メカニズムの違いを示唆するいくつかの違いがみられた。その中で重要と思われるのは、主観的輪郭では端点を検出した上で補間がなされるとみられるのに、ファントムでは端点の検出がなされないときに補間が生じると受け取ることができる点である。

1-3でのべた視覚的補間をとらえる二通りの考え方との関連から考察すると、主観的輪郭は、視覚系が欠損を検出した後に、それを穴埋めするように補間機能がはたらくケース2の事態に該当する現象と考えられるかもしれない。これに対して、ファントムは、後述するように、視覚系が刺激情報の処理を欠損を検出することなく補間を行うケース1にあたる可能性が強い。

6-1では、ファントムが「地」の知覚と密接な関連をもつことをのべた。一方、主観的輪郭は、「図」の領域のシャープな輪郭線として知覚される。このことは高空間周波数成分に応答する機構も関与していることを示すものであり、主観的輪郭が「図」の知覚と関連性をもつことを示唆している。

### 6-4 透明視現象との関連

ファントムは、帯の輝度が誘導縞の平均輝度レベルに近いときには生

起しないことは3-4でのべた。この理由の一つとして、Sakurai & Gyoba (1985) は、透明視現象の関与をあげている。

ファントムが成立するとき、補間された縞の領域には、透明感が伴うことがある。透明視現象は、別名、同時的前後視ともよばれるように、この現象においても、同一位置に二つの領域が存在するように知覚する二重表現(6-1-2参照)が成立している。ところが、帯が平均輝度レベルにあるとき、このような透明感は全く知覚されない。以下にのべるように、帯が平均輝度レベルにあるときには透明視の制約が満たされず、補間に必要な二重表現が実現されないのである。

Metelli (1970) の透明視係数の公式は物理的な反射率に基づいているが、これを試みに見かけの明るさについて適用することにして、図6-10に示すように誘導縞の明るい部分(白縞)と暗い部分(黒縞)の明るさをそれぞれa、bとし、それらの部分と交差する帯の領域の見かけの明るさをそれぞれp、qとする。今、同相の縞が誘導されているとすると、透明視係数 $\alpha = (a - b) / (p - q)$ はプラスで、透明視が生じる条件となる。一方、縞誘導効果により逆相の縞が誘導されているとすると、 $\alpha$ はマイナスになり、透明視の成立に必要な条件が満たされていないことになる(Beck et al., 1984)。

それでは、透明視はファントムの決定要因であるかという、そうとはいえない。その理由は、透明視の関与が、はじめに同相の縞、あるいは逆相の縞が帯の領域に誘導されていることを前提にして議論しているからである。すなわち、透明視はファントムの知覚の決定要因ではなく、誘導された縞の位相関係によって促進要因、あるいは阻害要因として働くと考えられる(8章参照)。



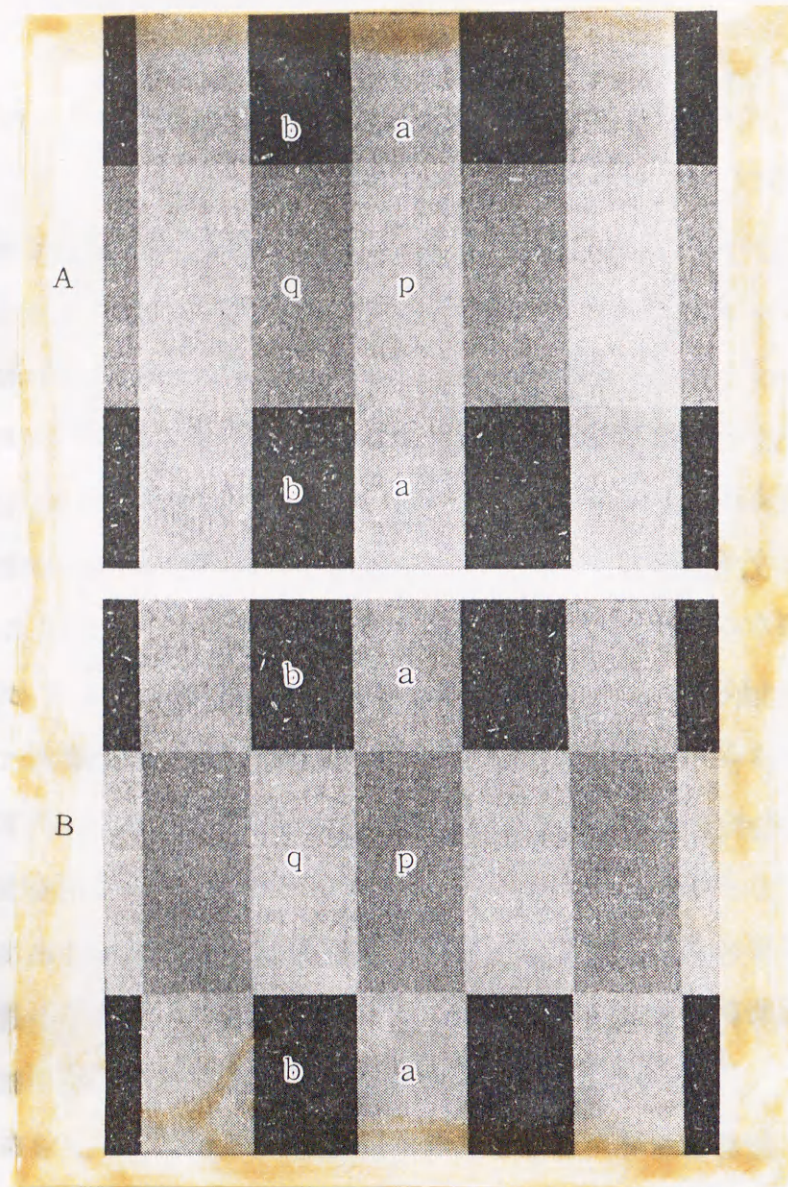


図6-10 透明視現象の関与。A：帯に同相の縞が誘導されている状態では、透明視が成立する明るさ関係となり、二重表現がより明瞭に知覚される。B：縞誘導効果により、逆相の縞が誘導されている状態では、透明視は不成立となり、二重表現は知覚されない。  
(行場，1986 より)

## 6-5 Poggendorff 錯視との関連

Poggendorff 錯視は、補間の不成功例ともいえる現象であり (Gyoba, 1978; 行場, 1991a)、長方形の左右の斜め線分が、物理的には一本の直線として連続線上にあるのに、それらがどうしてもつながって見えないというものである (図6-11a参照)。しかし、図6-11bに示すように、Poggendorff 錯視には異方性があり、図形を適当に回転して斜め線分の方位を変え、それが垂直あるいは水平になるようにすると錯視は消失する。垂直・水平方位の線分は、それを分断する対象の方位にかかわらず、容易に連結される。

3-8ですでに検討したように、ファントムに見え方にも方位特性があり、誘導縞が斜めの場合には、斜め方位よりも、垂直方位に優性にファントムがあらわれた。また、刺激布置を適当に回転して、誘導縞が垂直で、帯が斜めになるようにすると、連結距離が長くなるのにかかわらず、やはり垂直方位にファントムがあらわれやすいことが明らかにされた。

ファントムと Poggendorff 錯視は視覚系に次のような特性があることを共通して示している。つまり視覚的補間には異方性があり、垂直あるいは水平方位に強力にはたらくが、斜め方位にははたらきにくい傾向があるのである。

また、ファントムにおいて、誘導縞の空間周波数が高い場合には、連結距離が短くてすむ方位にファントムがあらわれることも示されたが、この方位は Poggendorff 錯視で生じる変位と一致するものである (3-





図 6-1 1 Poggendorff 錯視とその異方性。

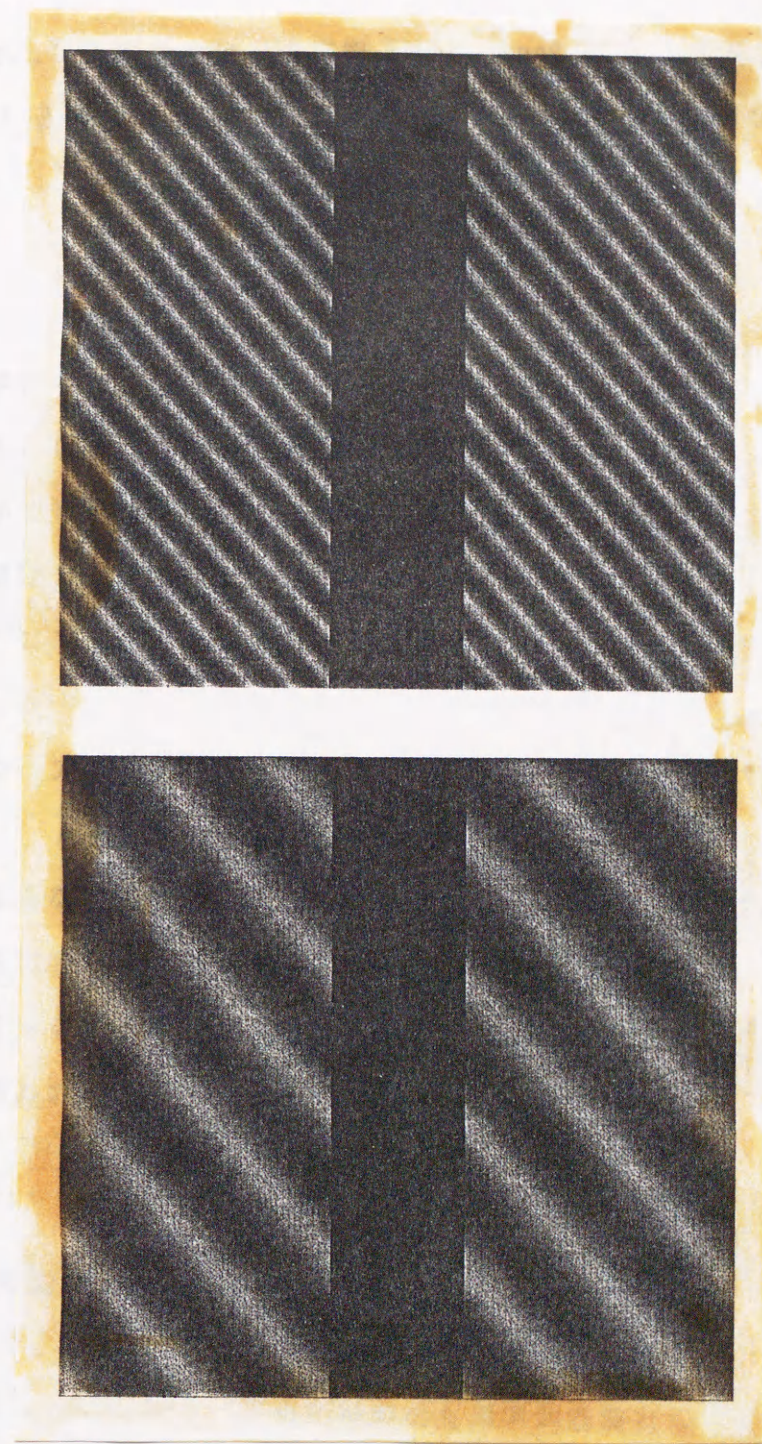


図 6-1 2 Poggendorff 錯視において、テスト図形を縞模様にし、その空間周波数を変えた場合。高空間周波数の縞では大きな錯視が生じるが、低空間周波数の縞では錯視はかなり小さい。



8 参照)。このことは、Poggendorff 錯視を生起させるのは、もっぱら斜め線分のもつ高空間周波数成分であることを示唆している（行場，1992a）。図 6-12 はこの可能性を示したものである。



## 7 視覚的補間の生理学的基盤

心理学者にはすぐ生理学的知見にたよって現象を説明するよくない傾向があるといわれる。確かに Marr (1982) がいうように、鳥が空を飛ぶことができる事実を一本の羽毛の特性から説明するような極端な還元主義は排除しなければならない。

一方、コンピュータのソフトウェアを理解しようとする場合を考えてみると、ハードウェアの知識があったほうが有利であるのは確かである。ハードウェアがソフトウェアの動作に基本的な制限を与えているからである。

このような意味で、視覚的補間、特に視覚的ファントムの担い手となりうる生理学的機構を探し、その特性がどのような制限を補間現象にもたらしめているかという観点からながめなおしてみるのは極めて有意義であると思われる。

### 7-1 大細胞系の特性：小細胞系との対比から

ファントムも含めて、視覚的補間の生理学的基盤として注目されるのは、Livingstone & Hubel (1987) が霊長類の視覚系の下位システムとしてその特性を明らかにした大細胞系 (magno system) である。まず、このハードウェアの構造と特性についてのべる（図 7-1 参照）。



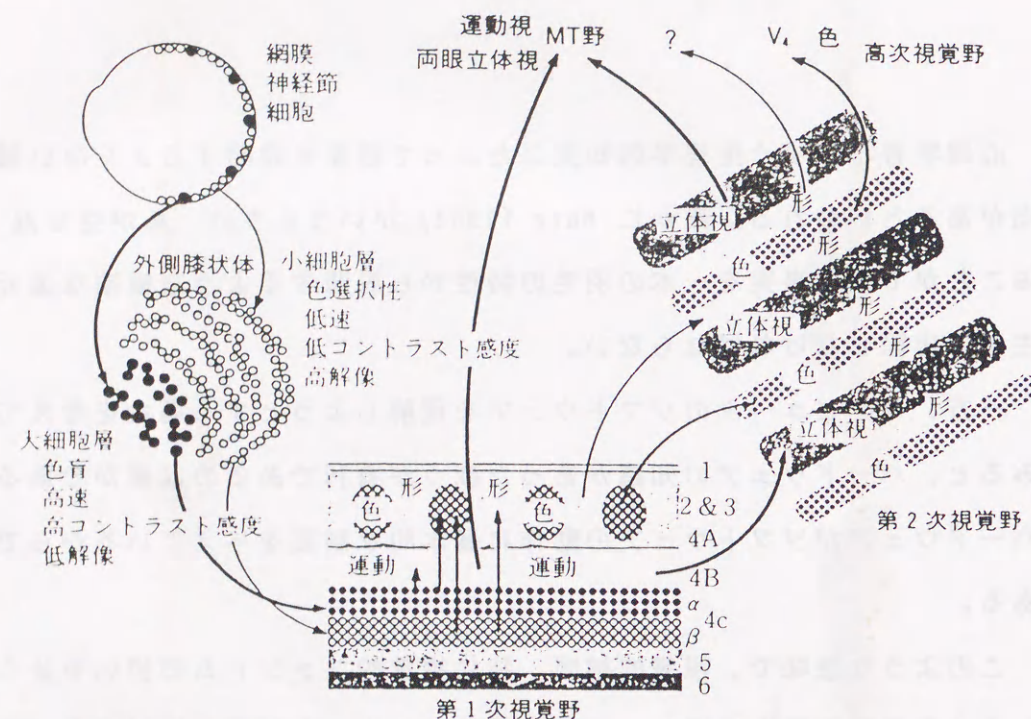


図7-1 Livingstone & Hubel が明らかにした視覚系の下位システムをあらわす概念図。大細胞系の経路は太線で、小細胞系のそれは細線で示されている。(Livingstone & Hubel, 1988 より、一部改変)

視神経は大腦皮質視覚領に到達する前に、外側膝状体で中継される。外側膝状体は6層に別れているが、腹側の2層には大きなニューロンが集まっているので大細胞層とよばれる。この層のニューロンは、タイプAとよばれる網膜神経節細胞から入力を受けているが、大腦皮質との関係では第1次視覚野(V1)の4C $\alpha$ 層・4B層とよばれるところになり、さらに第2次視覚野(V2)の太帯、そして上側頭溝にあるMT野に連結性をもっている。大細胞層のニューロンが示す特性は上位の中枢に引き継がれる。それゆえ、この経路は全体として大細胞系とよばれ、外側膝状体の他の4層から出発する小細胞系(parvo system)とは全くことなった特徴をもっていることがわかっている。

大細胞層のニューロンの受容野は大きいので、解像度は低く、あまり細かなものはとらえることができない。そのかわり応答はすばやく、刺激のオン・オフを敏感にキャッチする。また、刺激のコントラストがわずかであっても感度よく応答するが、明るさの違いさえあればどのような色にも応答するいわば色盲ニューロンである。大腦皮質の第1次視覚野にある4B層や第2次視覚野にある太帯、そしてMT野のニューロンは、特定の方位や両眼視差、および運動方向をもつ刺激に選択的応答を示し、したがって奥行視や運動視の機能と密接な関連があることが知られている。

重要なのは、視覚野上の大細胞系のニューロンが刺激の末端には并別的応答をせず、エンドストップ特性をもたないものが多いことである。図7-2に示すように、受容野の偏好方位と刺激の方位があていれば、刺激の長さはどのようなものでもよく応答する。エンドストップ特性がないことは、刺激の端点(エンドポイント)を検出しないので、結果として、同じ方位をもつ刺激を連結して処理する可能性が考えられる。



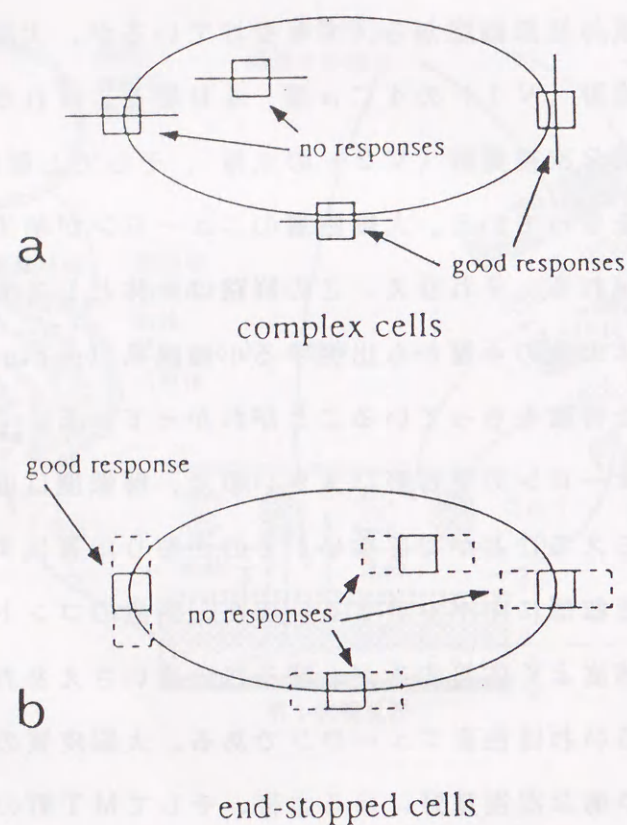


図7-2 エンドストップ特性をもたない視覚ニューロン（a）と、それをもつニューロン（b）の応答特性。前者のニューロンは、受容野の偏好方位と一致すれば、どのような長さの輪郭にも応答し、端点を検出しない。後者のニューロンは、興奮性の受容野の両側に抑制性の領域をもち、特定の長さの輪郭や、その曲率が大きいところで応答を示す。（Hubel & Livingstone, 1987 より、一部改変）

これに対し小細胞系は、タイプBとよばれる網膜神経節細胞→外側膝状体の小細胞層という経路をたどり、V1野でさらに2つの下位系に別れる。その1つは、4C $\beta$ 層→ブロップ間領域→V2の帯間領域→V3野およびV4野という経路で、インターブロップ系とよばれている。小細胞系の受容野は一般に小さく、解像度が高い。コントラストの増加に対して応答強度はゆるやかに増加し、なかなか飽和しない。インターブロップ系のニューロンは色度差をもてばどんな色のエッジにも応答する。刺激の末端に弁別的応答を示すエンドストップ特性をもつものが多いことがわかっている。エンドストップ特性は曲率の抽出にも有効と考えられるので、インターブロップ系は形状の詳細な分析を担う役割をもっていると考えられる。

## 7-2 大細胞系の機能低下時における視覚的補間

視覚的補間の担い手として大細胞系が候補にあげられたのは、次のような理由からである。大細胞系がどんな機能をしているのかを探るには、そのはたらきが低下する状態では私たちの知覚がどのように変化するのかを検討すればよい。Livingstone & Hubel (1987) は色は異なるが明るさは等しい刺激（等輝度・色度差刺激）がどのように知覚されるかを調べることにより、大細胞系のはたらきを推測している。上にも述べたように、大細胞系のニューロンは明るさのコントラストがないと活動しないからである。これにならって視覚刺激を等輝度・色度差条件で観察してみると、視覚的補間が生起しないことが明らかになってきたのである（行場, 1991a）。



まず、ファントムであるが、3-7で検討したように、誘導縞を等輝度・色度差縞にすると、ファントムはほとんど見えないことがわかる。

次に「地」の知覚であるが、図地反転図形を等輝度条件で観察すると、反転が頻繁に起こること、両方の領域がしばしば同時に「図」として見えることなどから、特に「地」の知覚が阻害されることが示されている(6-1-1参照)。

主観的輪郭は、誘導図形が等輝度で色度差のみで描かれていると、弱くなるか、消失することが報告されている(6-3-1参照)。

透明視も、透明視係数の算出公式からすると、領域間に輝度差がなければ必要条件が満たされない(6-4)。

最後に Poggendorff 錯視であるが、等輝度条件で提示した場合には、錯視が減少すると報告されている(Livingstone & Hubel, 1987)。しかし、そこで視覚的補間が行われていると認めるわけにはいかない。注意深く観察してみると、等輝度条件では錯視が減少するからといって、斜線が連結して見えるわけではなく、左右の斜線の位置関係がうまくつかめないで、ずれているかどうかもわからなくなるというのがむしろ事実に近いようだ。

### 7-3 連結機能の一側面としての視覚的補間

上述したように、Livingstone & Hubel (1987) は、様々な等輝度・色度差刺激を用いた実験を行い、運動視と奥行視の主要な部分は大細胞系が担い手である証拠をえている。例えば、ランダムに点を配置した刺激を用いた場合、等輝度条件では仮現運動や両眼立体視が成立しにくい

ことがわかっている。

Barlow (1981) によれば、運動視も奥行視も視覚情報から共通成分を抽出して連結(linking)するというより普遍的な機能の一側面であると考えられる。大細胞系は視覚的補間もふくめてこのような連結機能を幅広く担当しているのであろう。

連結機能を可能にしている要因には、まず大細胞系のニューロンの受容野が大きいことがあげられよう。受容野が大きければ、それだけ視野の広い範囲にわたる情報に応じることができるからである。さらに、同じ方位や運動方向などに応答するニューロンは、その受容野の位置がはなれていても互いに結合関係をもっていることが報告されており、領域間にすこしぐらいのギャップがあっても、それらが同じ属性をもっていれば、視野の広い範囲にわたってインタラクションをもつ可能性がある(Nakayama et al., 1989)。また、視覚野上の大細胞系ニューロンが刺激の末端に応答する特性(エンドストップ特性)をもたないものが多いことも大きな要因であると考えられる。

### 7-4 一過型チャンネルおよび持続型チャンネルとの関連

4-1では、視覚チャンネルについての解説を行い、特に一過型チャンネルと視覚的ファントムとの対応関係を議論してきた。

一過型チャンネルと持続型チャンネルの生理学的基盤は、従来、ネコの網膜で見つかったY細胞、X細胞に求められていた。しかし、その特性の整合性をめぐっていくつかの問題が指摘されている。現在では、両チャンネルの基盤は、霊長類の視覚系の下位システムとして解明の進ん



だ大細胞系と小細胞系 (Livingstone & Hubel, 1987)に求められてきている (Breitmeyer & Williams, 1990)。

視覚的ファントムを考察する際にも、一過型チャンネルの特徴として従来とりあげられてきた特性との関連を考えただけでは限界がある (4-1 参照)。そこで、7-1で紹介したように、そのユニークな特性が詳細に解明されてきた大細胞系との関連から広く考察したほうがより妥当な知見が得られると考えられる。

## 8 視覚的ファントムの特性と 生起過程のまとめ

以上、視覚的ファントムの特性を詳細に分析し、関連する視覚的補間現象との相違点を列挙してきた。また、生理学的基盤についても検討を加えた。この章では、これまでの考察を総括する意味で、まず、視覚ファントムの特性と、補間現象としての特質を要約し、その生起過程について一つのモデルを提出してみよう。

### 8-1 視覚的ファントムの特性の要約

視覚的ファントムとは、縞刺激の中央部分を不透明な帯で遮蔽すると、遮蔽部分にも淡い縞が誘導され、上下の縞が連結して見える現象である。種々の実験や、関連研究の検討を通して明らかになった視覚的ファントムの特性をまとめ、以下に書き出してみる。

A：視覚的ファントムは、誘導縞の空間周波数が低い場合 (3 ~ 6 c/deg 程度以下) に出現する現象である (3-1)。

B：誘導縞が運動または明滅していたほうが、つまり誘導縞の時間周波数が高いほうが出現しやすい (2-2、2-3、3-2)。

C：視覚的ファントムが知覚されるまでには、ある一定の時間 (あた



ため期間が必要である(2-2、3-3)。

D: 帯の輝度が誘導縞の平均輝度レベルにあるときには発生せず、逆相の縞が誘導される(3-4、5-3)。

E: 誘導縞にわずかなコントラストがあれば知覚され、コントラストの増加による効果はすぐに飽和する(3-5)。

F: 誘導縞の輝度が低く、薄暮視、暗所視レベルでよく知覚される現象である(2-1、3-6)。

G: 等輝度・色度差条件の誘導縞では発生しない(3-7、7-2)。

H: 垂直方位に優勢に出現し、斜め方位には発生しにくい(3-8、6-5)。

## 8-2 視覚的補間現象としての特異性

視覚的ファントムは空間的補間で、感性的補間に分類される現象であるが(1-2)、以下のようなユニークな特性をもっている。

はじめ帯の背後に非感性的に補間されていた縞が、あたため期間の経過の後、帯の前面に連結して実際に知覚されるようになる。このような意味で、ファントムは非感性的補間と感性的補間の橋渡しを行い、両者を連続線上で考察するチャンスを提供するユニークな現象といえる(6-2)。ファントムが知覚されたり、されなかったりする不安定性も、この観点から考察すれば、積極的な意味をもたせることができる。

また、視覚的補間の研究を拡充する上で、ファントムが縞刺激を用いてみいだされ、検討がなされてきた点には大きな意義があると思われる。縞刺激は、各種パラメータの操作が極めて容易で、線形システム分析法

による効率のよい解析ができる利点をもっている(2-4)。それゆえ多数の視覚生理学的研究や心理物理学的研究で縞刺激が用いられているが、それらの研究との対応を広く検討できる可能性がもたらされたのである(4-1、4-2、5-3、6-4)。

## 8-3 ファントムの生起過程モデル

ファントムの生起過程について、上述した特性を包括的に説明できる一つのモデル(図8-1)を提出してみる。

### 8-3-1 基本過程

まず、ベースとなるのは大細胞系のはたらきである(図8-1参照)。今、輝度変化において低空間周波数成分を含む刺激が、かなり低い輝度レベル(薄暮視か暗所視レベル)で提示されたとする。コントラストは低くてもかまわない。このような条件では、小細胞系の活動は低下しており、相対的に大細胞系のはたらきが活発になっているはずである(7-1)。大細胞系のニューロンはエンドストップ特性をもたないものが多いので(7-1)、誘導縞と帯の境界(特に、黒帯のときには黒縞の稜との間、白帯のときには白縞の稜との間)において、誘導縞の端点(T型接点)は検出されにくくなると考えられる(6-2)。端点が検出されなければ、縞が帯の前面に位置づけられる可能性が生じる。このとき、奥行き関係の制約がとけ、感性的補間が成立する条件が整う(6-2)。この奥行きの反転に要する時間はあたため期間に対応するとみら



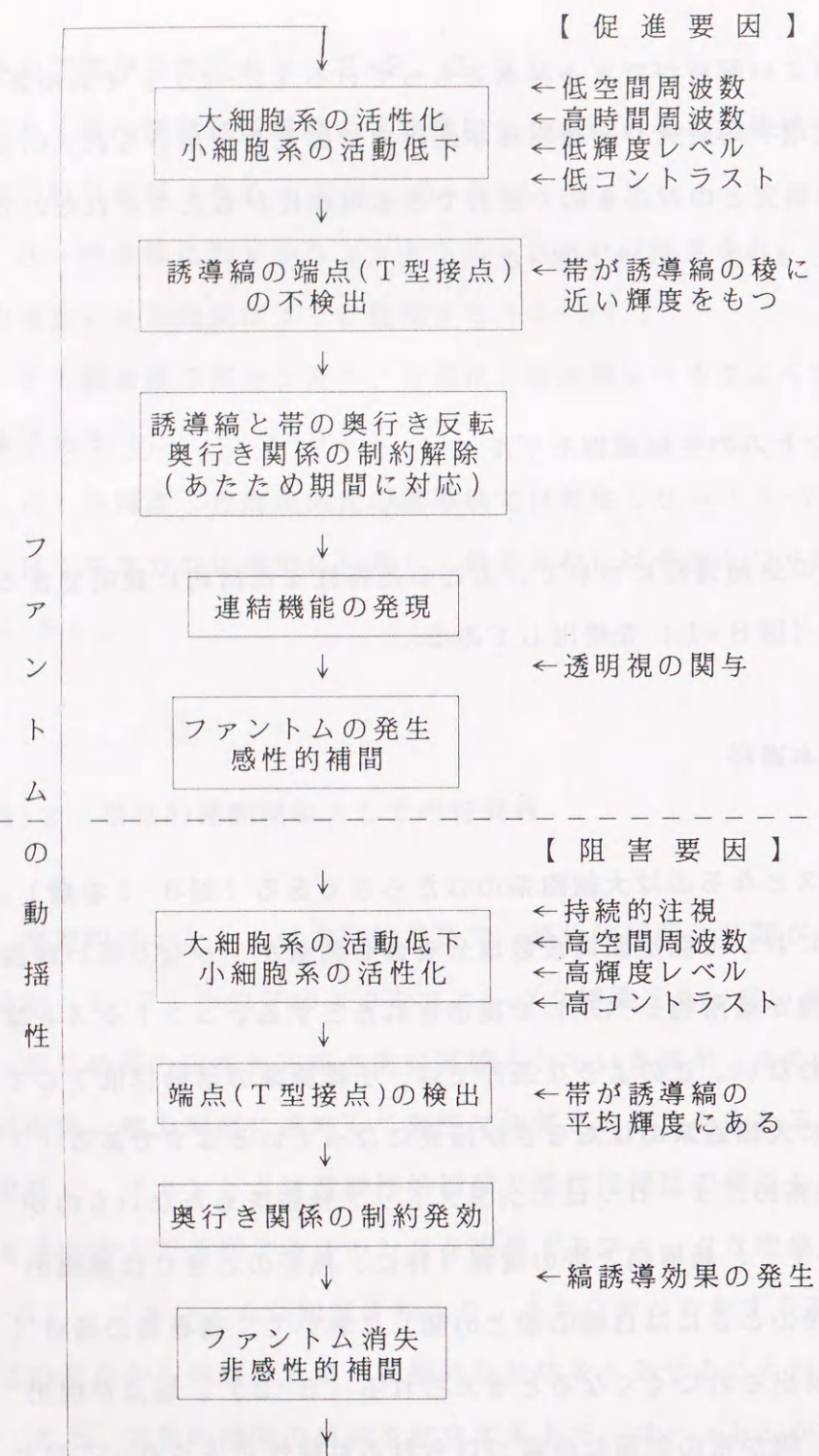


図 8-1 ファントムの生起過程モデル。

れる。大細胞系のニューロンの受容野は大きく、共通成分を抽出して連結するはたらきが強くあらわれることにより（7-3）、上下の縞は補間されて知覚される。

大細胞系の応答は一過的であり、特に持続的注視をしていると活動が停滞する。そのとき、今度は小細胞系のはたらきが活発になり、端点が検出され、誘導縞は帯の背後に位置づけられるので、奥行き関係の制約により非感性的補間となり、ファントムは消失する。これがファントムの知覚に動揺性が生じる理由であろう。

### 8-3-2 促進要因の関与

以上の基本メカニズムにさらに、次のような促進要因がファントムの知覚に関与すると考えられる。

もし、誘導刺激に高い時間周波数成分、すなわち運動やフリッカーなどがある、ますます大細胞系のはたらきが活発になり、小細胞系の活動が低下する（7-1）。運動ファントムやフリッカーファントムが発生しやすい理由はここにあると考えられる。このとき、大細胞系でとらえられる荒い形態なら、縞刺激に限らず、視野の広い範囲にわたって連結される可能性がある。ランダムドットやパターンをついた誘導刺激でも、それが高い時間周波数を含み、大細胞系が十分に活動している状態であれば、それらのファントムが知覚されうるであろう。

また、誘導縞の明るい部分（白縞）、あるいは暗い部分（黒縞）が連結し、帯の領域に同相の縞が誘導されているとすると、このときの領域の明るさ関係は透明視の制約を満たすことになり、ファントムの知覚はより促進されることが考えられる（6-4）。



### 8-3-3 障害要因の関与

促進要因でのべたこととは反対に、大細胞系のはたらきを低下させ、小細胞系を活性化するような要因はファントムの知覚を障害するとみなすことができる。

誘導縞の空間周波数が高くなると、空間解像度の粗い大細胞系の応答は低下するので、ファントムは発生しにくくなる。ファントムの臨界空間周波数（3-1）は、大細胞系の空間周波数応答特性や受容野の大きさと密接な関連をもつと考えられる。

誘導縞が等輝度・色度差条件にあるときには、大細胞系は輝度差をもたない刺激には応答しないので（7-1）、もっぱら小細胞系が処理を担当すると予想される。このとき、ファントムは生起しない。

帯が誘導縞の平均輝度レベルにあるときは、次のような理由により、ファントムが障害されると考えられる。帯と誘導縞の境界で、輝度差がなくなるのは縞の中腹にあたるポイントであるが、視覚系のエッジ検出の理論（Watt, 1988）からすると、このポイントはエッジの立たないところである。正弦波状に輝度変調された誘導縞において、エッジがたつ位置は、輝度が最大値あるいは最小値をもつ箇所、つまり黒縞あるいは白縞の稜であるが、このポイントでは平均輝度をもつ帯との間に強固な境界がT型接点としてできており、ファントムの発生に必要な奥行き反転は起こらない（6-2）。また、帯が平均輝度レベルにあるとき、縞誘導効果（5-1）が発生し、逆相の縞が帯の領域に作り出される。そのとき、それらの領域の明るさ関係は透明視が不成立となる条件になり、透明視による二重表現が生じる可能性も失われる（6-5）。

## 9 視覚的補間研究の

### 視覚論上の意義

本論文の最後にあたるこの章では、これまで行った考察をより高い視座からながめ、その位置を確認するため、視覚論全体の中で視覚的補間がどのような意義をもつか、本論で採用した視覚情報処理心理学の方法論的意義とともに追求してみることにする。

#### 9-1 3つの視覚論

視覚をどのようにとらえるかについて、大きくまとめれば、以下に紹介する3つの理論的立場があるといえよう（行場, 1989 参照）。

##### 9-1-1 Helmholtz 的見解

様々な形態をもつ複数の刺激が、同一の網膜像を結果としてもたらすことがありうる。しかるに、われわれの知覚するものは複数の解釈にわかれることはめったにない。このように、不確定な感覚情報から安定した一つの解釈に自動的にすばやくいたる知覚過程は、Helmholtz (1910) によって無意識的推論 (unconscious inference) とよばれ、古くから視覚論上のキーワードとして重視されてきた。

本論では、眼に入る刺激には外界の事物の属性をあいまいなく決定す



るには不十分な情報しか含まれておらず（仮定 H1 とよぶことにする）、生体内に蓄積した既存の知識や記憶、および期待や推論などの内的媒介過程が積極的にはたらくことにより私たちの知覚世界は成立する（仮定 H2 とする）とする考え方を Helmholtz 的見解とよぶことにする。

### 9-1-2 Gibson 的見解

Helmholtz 的見解は、特に、感知される情報の量や質が制限された状況であられる人間の知覚の融通性と頑健性を非常にうまくいあてている。しかし、少し考えなおしてみると、外界を認知する機能は人間以外の他の動物にとっても必要不可欠なものであり、下等生物にいたるまで知識や期待などにもとづく高次な過程を絶えずはたらかせているのかといった素朴な疑問が生じてくる。これに答えるのが Gibson (1979) の生態学的視覚論 (ecological optics) である。

Gibson は、物体や環境の属性の知覚に必要なすべての情報はすでに刺激の中に豊富に与えられており（仮定 G1 とよぶことにする）、生体は単にそれらを抽出すればよく、解釈や推論などの内的処理は必要がない（仮定 G2）と強調する。例えば自然環境内で活動する生体にとって運動や奥行の知覚に必要な情報は、オプティカルフロー (optical flow) とよばれる視覚刺激成分の速度変化パターンや、きめの勾配 (texture gradient) の中に光学的不変項 (optical invariants) として存在する主張した。

しかし、知覚される属性の各々について、それに対応する光学的不変項を入力情報から特定することは予想をこえてはるかに難しく、複雑な処理を多重に必要とする課題であることが最近のコンピュータビジョン

における研究から明らかになってきた。

### 9-1-3 視覚計算理論的見解

1980 年代に入って、視覚研究は新しい強力な視点を得たということが出来る。それは Marr (1982) の計算理論的アプローチである。

Marr (1982) は、複雑な情報処理系を理解するには次の 3 つのレベルのとらえかたがあることを説いた。まず考慮すべきなのは、計算理論 (computational theory) のレベルであり、処理系全体として何がどのような目的で計算されるのか、なぜそれが適切なのかを問うものである。次に、表現とアルゴリズム (representation & algorithm) のレベルがあり、上述の計算をどのようなアルゴリズムで行うのか、入力と出力はどのように表現されるかを問題とする。最後は、ハードウェアによる実現 (hardware implementation) のレベルであり、それらの表現やアルゴリズムが物理的にどのような仕組みで実現されるかを明らかにすることが目標となる。

Marr にとってみれば、これまでの視覚研究は、いわば羽毛の特性や羽の動かし方ばかりを調べ、揚力に関する空気力学的検討をあとまわしにして飛行を理解しようとするようなものであった。つまり、細かなハードウェア (視覚生理学) やアルゴリズム (視覚心理学) のレベルの分析はなされていても、視覚系全体として何を計算しているのか、なぜそのような計算が必要となるのかについての根本的な問い、すなわち計算理論的レベル (視覚計算理論) の問いが蔑ろにされているというのである。

この観点から、Marr は、視覚系の計算目標を、2 次元情報である網



膜に投影された画像から外界の3次元構造を復元することであるとした。この見解は、上述した Gibson 的見解の前提 (G1) を支持しているといえるが、内的処理の不必要性を説く考え (G2) には反対である。2次元情報から次元数の多い3次元世界を復元するのであるから、解は一義的には定まらない。そこで、外界についての暗黙の仮定、つまり種々の制約を利用しながら低次の表現から高次の表現が計算されてゆく上向きの推論過程が必要となる。

## 9-2 視覚的計算による補間と知識にもとづく補間

本論 1-1 で紹介した「見ることは賭けである」(Gregory, 1970)という言葉は、視覚過程がトップダウン的に進行するという意味に受けとられやすい。つまり、知識や予測が先行して外界を解釈すると考えがちになる。しかし、視覚的補間をこれまで検討してきた結果からすると、視覚系が行う「賭け」は、空間周波数、時間周波数、方位などの情報と、視覚環境がもつ奥行き関係の制約などを利用して領域を連結し、外界の3次元構造の復元をはかる地道な計算であるといえる。「無意識的推論」という用語をのこした Helmholtz も、また「見ることは賭けである」といった Gregory さえも、それらの言葉を用いた真意は、上向きの推論過程としてのこの計算のことを言い表したものととらえることもできる。図9-1は、視覚的計算による補間と知識に基づく補間がくいちがう場合がある例が示されている。

ここで、第1章であげた、視覚的補間の二通りのとらえ方にもどって考察を進めてみよう。二通りのとらえ方とは、次のようなものであった

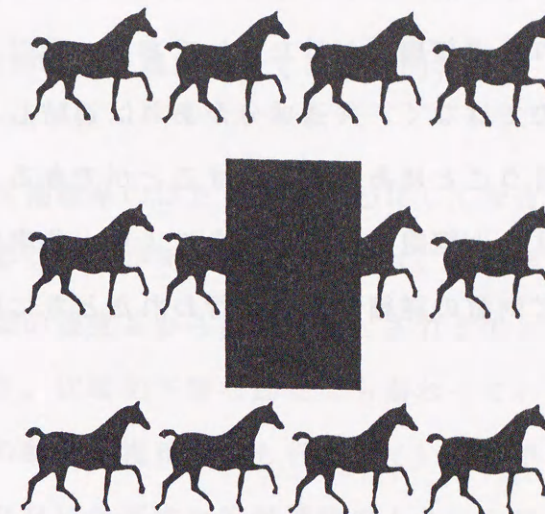


図9-1 視覚的計算による補間と知識に基づく補間の違い。ざっと見ると、絵の中央に長い胴の馬がいるように知覚される。知識がはたらき、2頭の馬がいるはずと思い直す。

(Kanizsa, 1979 より、一部改変)



(図1-2参照)。一つは、一部欠損のある刺激情報を視覚系が処理するとき、欠損を検出することなく、欠損のない情報を処理するのと同じ要領で処理してしまうとする考え方である。もう一つは、視覚系が特徴抽出の結果、刺激の一部に情報欠損のあることを検出した後、その欠損を穴埋めするように補間機構がさらにはたらくとする考え方である。

視覚的ファントムの生起過程モデルで示した大細胞系のはたらきを基本とした考え方(8章参照)は、明らかに前者に近い。大細胞系では特徴抽出と一体化された連結機能がはたらいており、その目的は欠損の分析的な検出にあるのではなく、共通成分があれば連結し、できるだけ経済性に富む処理を行うことにありとみなすことができる。視覚情報に欠損があるかどうかは、小細胞系のはたらきにより、曲率変化の大きい部分や端点の検出など刺激の詳細な分析が行われたときに検知されるのであろう。

### 9-3 情報圧縮処理としての視覚的補間

Sekuler & Levinson (1977) は、視覚的ファントムによる補間は、視覚系が効率のよい情報圧縮を行うために生起すると考えている。確かにわれわれの目にはいる膨大な量の情報に比べて、視覚系が処理できる許容量はわずかであり、そのために視覚系は様々な対策をしいられている。同じ奥行きや空間周波数、時間周波数、方位などの情報をもつ領域は個別に処理し符号化するよりも、共通領域としてパラメータを一つにまとめたほうがはるかに経済的である。

Attneave (1954) などは、視覚系を刺激情報から冗長性をはぎとり、

より経済的な形に符号化するシステムとさえみなしている。視覚的補間で補われる領域は、刺激情報のうちでも冗長性に富む領域にあたることが多く、視覚系の経済的・省力的情報処理様式と密接な関連があり、逆に視覚的補間を研究すれば、この巧妙な処理様式をうきばりにすることができるといえよう。

### 9-4 系統発生的に古い機能としての視覚的補間

視覚的補間が大細胞系のはたらきを中心にしてなされたと考えた場合にもう一つの重要な示唆がえられる。それは、系統発生的にみた場合、小細胞系が霊長類の視覚系から出現するとされるのに対し、大細胞系は古い視覚系であり、比較的下等な動物にも備わっていることから、視覚的補間がそれらの動物の視覚系でも行われていると予想できることである。補間というとなにか高次な推論機能のようにも思えるが、生態学的意義上極めて重要なものであり、それだけに、系統発生と比較的初期の段階から生体が身につけている視覚機能なのであろう。

### 9-5 前注意的処理過程としての視覚的補間

視覚心理学では古くから、知覚には大きく2つの処理モードがあることが指摘されてきた(行場, 1987 参照)。視野内の情報を広い範囲にわたって素早く、注意を伴わずに自動的に処理するモードと、限られた範囲に注意を向け、時間をかけて意識的に、かつ詳細に分析するモードで



ある。前者のモードは前注意的処理 (preattentive processing)、後者のモードは注意的処理 (attentive processing) とよばれている。

これまでのべてきた視覚的補間は、あきらかに前注意的処理に属するものである。隠された部分が連続していることは、自動的にさりげなく感じとられている。注意を向けたときにはじめてそれが本当に連続しているかどうか疑うことができる (図 9-1 参照)。

前節 (9-4) では、視覚的補間が比較的下等な動物でも行われている可能性があることを指摘したが、おそらく視覚的補間も含めて前注意的処理の大半が系統発生的に古い機能なのであろう。注意や意識をともなった分析的処理は、より高等な生体にそなわった新しい視覚機能といえるが、そのような処理も、前注意的処理によりあらかじめ視覚世界の構造がおおざっぱに抽出されているおかげで、効率よく進行することができるのであろう。

#### 9-6 視覚情報処理心理学の今日的意義

本論で採用された視覚情報処理心理学的アプローチの特色は、視覚現象の解明に、情報科学の領域で洗練されてきた概念や手法を積極的に取り入れ、得られた知見を視覚生理学やコンピュータビジョン研究とのインターフェースをとりながら、総合的に考察してゆくことにあった。視覚研究全体の中でその意義をわかりやすく図解してみたのが、図 9-2 である (行場, 1992b)。

Marr (1982) がのべたように、視覚研究にはハードウェア (視覚生理学)、アルゴリズム (視覚心理学)、計算目標 (視覚計算理論) の3つ

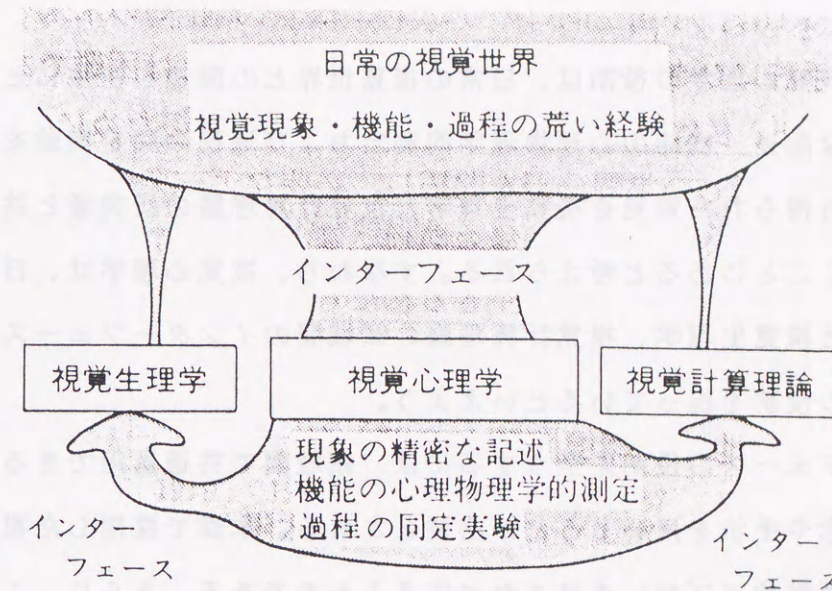


図 9-2 視覚心理学の役割を示す概念図。(行場, 1992bより)



のレベルの間かけが必要である。しかし、われわれが日々、意識・体験するところの豊かな視覚世界に直接、かかわりあいもつことができるのは、上述の3つの中では視覚心理学のみである。視覚生理学では微視的な分析が中心であり、一方、視覚計算理論では高度な数学的抽象化が要求されるので、日常の視覚世界とは一定の距離をもつことになってしまう。

そこで、視覚心理学の役割は、日常の視覚世界との関連を密接にとり、現象の精密な記述、機能の心理物理学的測定および過程の同定実験を行い、そこから得られた知見を視覚生理学と視覚計算理論の研究者と共に考察してゆくことにあると考えられる。すなわち、視覚心理学は、日常の視覚世界と視覚生理学、視覚計算理論の領域間のインターフェースをとるかなめの役割を担っているといえよう。

インターフェースの役割を全うするには、領域間で共通適用できる情報科学的概念や手法を用いることが必要とされる。本論で採用した視覚情報処理心理学的アプローチはこれに応えるものである。さらに、このアプローチは、視覚の領域だけにとどまらず、情報処理一般についても有益な知見をもたらすと期待される。視覚系は、生体が有するもっとも進んだ情報処理システムにあげられている。そこで、視覚の巧妙な情報処理方式を参考にして、効率のよい情報処理システムを設計してゆくことが有効となる。

また、研究活動も一種の情報処理とみなせば、そこでも共通の方式が採用できることが考えられよう。視覚系がもつ巧妙な情報処理のやり方を取り入れて、自分の研究スタイルとするのである。丸山は、この姿勢を「視覚をまねて研究を進める」という言葉でいいあらわしている（私信による）。例えば、特定の研究領域を注意深く、詳細に分析すること

も必要だが、大雑把に幅広くいろいろな研究領域をながめ、相互関連をつかむことも研究を進める上では大切である。この意味で、視覚的補間は様々な研究アプローチや視覚論のギャップを補間し、連結してくれるヒントを私たちに提供してくれているように思われてならない。



## 謝 辞

丸山欣哉教授（東北大学文学部）には、筆者が視覚的補間を研究テーマとする契機を与えていただいたばかりでなく、数々の貴重な御助言を賜り、この論文が形となるのを暖かく見守っていただいた。

櫻井研三氏（現在、東北学院大学教養学部）には、共同研究者として実験装置の複雑な調整や操作をはじめ、いくつかの実験を遂行していただいた。彼との熱い討論が本論で引用された連名論文を生んだ。

Dr.Robert Sekuler、Dr.Naomi Weisstein、Dr.Mark E.McCourt、Dr. John M.Foley の各氏には、書簡や直接のコミュニケーションで貴重なコメントと親切なサポートをいただいた。

暗室中での長い実験の被験者になってくれた東北大学文学部と信州大学人文学部の心理学専攻生の皆様にも感謝したい。

本研究の基礎となるデータが得られた実験の多くは、文部省科学研究費（課題番号 57710025、02710043、03831006）による助成を受けている。記して感謝したい。



## 引用文献

- Anstis, S.M. & Cavanagh, P. 1983 A minimum motion technique for judging equiluminance. In J.D. Mollon & L.T. Sharpe (Eds.) *Colour vision*. London: Academic Press, Pp.156-166.
- Attneave, F. 1954 Some informational aspects of visual perception. *Psychological Review*, 61, 183-193.
- Barlow, H.B. 1981 Critical limiting factors in the design of the eye and visual cortex. *Proceedings of Royal Society of London*, B212, 1-34.
- Beck, J., Prazdny, K. & Ivry, R. 1984 The perception of transparency with achromatic colors. *Perception & Psychophysics*, 35, 407-422.
- Breitmeyer, B.G. & Ganz, L. 1976 Implications of sustained and transient channels for theories of visual pattern masking, saccadic suppression and information processing. *Psychological Review*, 83, 1-36.
- Breitmeyer, B.G. & Williams, M.C. 1990 Effects of isoluminant-background color on metacontrast and stroboscopic motion : Interrations between sustained (P) and transient (M) channels. *Vision Research*, 30, 1069-1075.
- Bringer, W.L. & Gallagher, M.B. 1974 Subjective contour: Apparent depth or simultaneous brightness contrast? *Perception and Motor Skills*, 38, 1047-1053.
- Brown, J.M. & Weisstein, N. 1991 Conflicting figure-ground and depth information reduces moving phantom visibility. *Perception*, 20, 155-165.
- Campbell, F.W. & Green, D.G. 1965 Optical and retinal factors affecting visual resolution. *Journal of Physiology*, 181, 576-593.
- Campbell, F.W. & Robson, J.G. 1964 Application of Fourier analysis to the modulation response of the eye. *Journal of the Optical Society of America*, 54, 581.
- Chapanis, A. & McCleary, R.A. 1953 Interposition as a cue for the percetion of relative distance. *Journal of General Psychology*, 48, 113-132.
- Coren, S. 1972 Subjective contours and apparent depth. *Psychological Review*, 79, 359-367.
- 江島義道・三浦佳世 1982 空間周波数チャンネルの空間特性 光学, 11, 397-405.
- Ejima, Y. & Takahashi, S. 1985a Apparent contrast of a sinusoidal grating in the simultaneous presence of peripheral gratings. *Vision Research*, 25, 1223-1232.
- Ejima, Y. & Takahashi, S. 1985b Effects of localized grating adaptation as a function of separation along the length axis between test and adaptation areas. *Vision Research*, 25, 1701-1707.
- Foley, J.M. & McCourt, M.E. 1985 Visual grating induction. *Journal of the Optical Society of America*, A2, 1220-1230.
- Frisby, J.P. & Clatworthy, J.L. 1975 Illusory contours: Curious case of simultaneous brightness contrast? *Perception*, 4, 349-357.
- Genter, C.R., II, & Weisstein, N. 1981 Flickering phantoms: A motion illusion without motion. *Vision Research*, 21, 963-966.
- Georgeson, M. 1979 Spatial Fourier analysis and human vision. In N.S. Sutherland (Ed.) *Tutorial essay in psychology*. Vol.2. New York: John Wiley & Sons, Pp. 39-88.
- Gibson, J.J. 1979 *The ecological approach to visual perception*. Boston: Houghton Mifflin Company.
- Ginsburg, A.P. 1975 Is illusory triangles physical or imaginary? *Nature*, 257, 215-220.
- Gregory, R.L. 1970 *The intelligent eye*. New York: McGraw-Hill.
- Gyoba, J. 1978 The Poggendorff illusion under stereopsis. *Tohoku Psychologica Folia*, 37, 94-99.
- Gyoba, J. 1979 Differential adaptation to invisible gratings blocked by stereoscopically raised planes. *Tohoku Psychologica Folia*, 38, 29-35.
- 行場次朗 1981 Rosenbach 効果と空間周波数処理 日本心理学会第45回大会発表論文集, 165.
- Gyoba, J. 1983 Stationary phantoms: A completion effect without motion and



- flicker. Vision Research, 23, 205-211.
- 行場次朗 1983 CRTによる Grating Pattern の呈示法について 信州大学人文学部人文科学論集, 17, 45-57.
- 行場次朗 1986 視覚的ファントム現象と空間周波数処理機構: 特徴抽出器に基づく補間知覚現象の説明の妥当性について 心理学評論, 29, 350-363.
- 行場次朗 1987 視覚系の図地分離における非対称性: 前注意的処理過程の特質 テレビジョン学会技術報告, 11, 19-24.
- 行場次朗 1989 知覚の成立過程 市川伸一・伊東裕司(編) 認知心理学を知る(第2版) ブレーン出版, Pp.11-26.
- 行場次朗 1990 図と地の処理に異なる視覚システムが関与する可能性 電子情報通信学会技術研報告, IE89-82, 1-6.
- 行場次朗 1991a 視覚的補間: 隠されたものを見通すはたらきを探る 箱田裕司(編) 認知科学のフロンティア サイエンス社, Pp.9-30.
- 行場次朗 1991b 視覚的ファントム現象と大細胞系の特性との関連 日本心理学会第55回大会発表論文集, 148.
- 行場次朗 1991c 図と地の知覚: 視覚の心理 電子情報通信学会誌, 74, 315-320.
- 行場次朗 1992a 視覚的ファントムの方位特性 日本心理学会第56回大会発表論文集, 516.
- 行場次朗 1992b 視覚心理学と視覚探索 数理科学, 10月号, 70-74.
- 行場次朗・丸山欣哉 1978 補間知覚について: 情報処理心理学的アプローチ 文化, 42, 52-67.
- Helmholtz, H.L.F.v. 1910 Handbuch der Physiologischen Optik. In Helmholtz's treatise on physiological optics. Translated by J.P. Southall, 1925. New York: Dover.
- Hubel, D.H. & Livingstone, M.S. 1987 Segregation of form, color, and stereopsis in primate area 18. The Journal of Neuroscience, 7, 3378-3415.
- Kanizsa, G. 1976 Subjective contours. Scientific American, 234, 48-52.
- Kanizsa, G. 1979 Organization in vision. New York: Praeger. 野口薫(監訳) 視覚の文法 サイエンス社

- Kellman, P.J. & Shipley, T.F. 1991 A theory of visual interpolation in object perception. Cognitive Psychology, 23, 141-221.
- Klymenko, V., Weisstein, N., Topolski, R., & Hsieh, C. 1989 Spatial and temporal frequency in figure-ground organization. Perception & Psychophysics, 45, 395-403.
- Koffka, K. 1935 Principles of Gestalt psychology. London: Kegan Paul. 鈴木正彌(監訳) ゲシュタルト心理学の原理 福村出版
- Kulikowski, J.J. & Tolhurst, D.J. 1973 Psychological evidence for sustained and transient detectors in human vision. Journal of Physiology, 232, 149-162.
- Legge G.E. 1978 Sustained and transient mechanisms in human vision: Temporal and spatial properties. Vision Research, 18, 69-81.
- Liebmann, S. 1927 Über das Verhalten farbiger Formen bei Helligkeitsgleichheit von Figur und Grund. Psychologische Forschung, 9, 300-353.
- Livingstone, M.S. & Hubel, D.H. 1987 Psychological evidence for separate channels for the perception of form, color, movement and depth. The Journal of Neuroscience, 7, 3416-3468.
- Livingstone, M.S. & Hubel, D.H. 1988 Segregation of form, color, movement, and depth: Anatomy, physiology, and perception. Science, 240, 740-749.
- Marr, D. 1982 Vision. New York: Freeman. 乾敏郎・安藤広志(訳) ビジョン 産業図書
- Maruyama, K. & Iwasaki, S. 1973 "Prospective perception" and the tunnel phenomenon. Tohoku Psychologica Folia, 32, 134-146.
- McCourt, M.E. 1982 A spatial frequency dependent grating induction effect. Vision Research, 22, 119-134.
- McCourt, M.E. 1990 Disappearance of grating induction at scotopic luminance. Vision Research, 30, 431-437.
- Metelli, F. 1970 An algebraic development of the theory of perceptual transparency. Ergonomics, 13, 59-66.
- Metzger, W. 1953 Gesetze des Sehens. Frankfurt: Kramer. 盛永四郎(訳) 視覚の法



則 岩波書店

- Michotte, A. 1963 The perception of causality. London: Methuen.
- Miller, G.A. 1967 Psychology. New York: Harper & Row. 戸田壹子・新田倫義 (訳)  
心理学の認識 白揚社
- Mulvanny, P., Macarthur, R. & Sekuler, R. 1981 Threshold for seeing visual  
phantoms and moving gratings. Perception, 11, 35-46.
- Nakayama, K., Shimojo, S., and Silverman, G.H. 1989 Stereoscopic depth: Its  
relation to image segmentation, grouping, and the recognition of occluded  
objects. Perception, 18, 55-68.
- 野口薫 1977 無から有へ 藤田統・森孝行・磯見芳郎 (編) 心の実験室2 福村出版,  
Pp.125-148.
- 野口薫・増田直衛 1980 ふしぎな本 1 さっかく 講談社カラー科学大図鑑D-2  
講談社
- Parks, T.E. & Pendergrass, L. 1982 On the filtered component approach to  
illusory visual contours. Perception, 32, 491-493.
- Petry, S. & Meyer, G.E. (Eds.) 1987 The perception of illusory contours. New  
York: Springer-Verlag.
- Ratoosh, P. 1949 On interposition as a cue for the perception of distance.  
Proceedings of the National Academy of Sciences, 35, 257-259.
- Rock, I. & Anson, R. 1979 Illusory contours as the solution to a problem.  
Perception, 8, 665-681.
- Rosenbach, O. 1902 Zur Lehre von den Urtheilstauschungen. Zeitschrift fur  
Psychologie, 29, 434-448.
- Sakurai, K. & Gyoba, J. 1985 Optimal occluder luminance for seeing stationary  
visual phantoms. Vision Research, 25, 1735-1740.
- 櫻井研三・行場次朗 1986 矩形波誘導線による phantom の最適帯輝度レベル 日本基  
礎心理学会第5回大会発表論文集, 37.
- Sekuler, R. & Blake, R. 1985 Perception. New York: Alfred A. Knopf.
- Sekuler, R. & Levinson, E. 1977 The perception of moving targets. 河内十郎 (訳)

動いている対象の知覚 別冊サイエンス 特集 視覚の心理 イメージの科学 日経サイ  
エンス社, Pp. 72-82.

- Stadler, M. & Dieker, J. 1972 Untersuchungen zum Problem virtueller Konturen in  
der visuellen Wahrnehmung. Zeitschrift fur Experimentelle und Angewandte  
Psychologie, 19, 325-350.
- Takahashi, S. & Ejima, Y. 1985 Effects on grating detection of vertically  
displaced peripheral gratings. Vision Research, 25, 129-136.
- Tolhurst, D.J. 1975 Reaction times in the detection of gratings by human  
observers: A probabilistic mechanism. Vision Research, 15, 1143-1149.
- Tynan, P. & Sekuler, R. 1975 Moving visual phantoms: A new contour completion  
effect. Science, 188, 951-952.
- 渡辺武郎・永瀬英司 1989 主観的輪郭形成のメカニズム 基礎心理学研究, 8, 17-32.
- Ware, C. 1981 Subjective contours independent of brightness contrast. Perception  
& Psychophysics, 29, 500-504.
- Waltz, D. 1975 Understanding line drawings of scenes with shadows. In P.H.  
Winston (Ed.) The psychology of computer vision. New York: McGraw-Hill. 白井良  
明・杉原厚吉 (訳) コンピュータービジョンの心理, Pp.21-99.
- Watt, R.J. 1988 Visual Processing: Computational, Psychophysical, and Cognitive  
Research. Lawrence Erlbaum Associates. 乾敏郎 (監訳) 視覚情報処理モデル入門:  
計算論的アプローチ サイエンス社
- Weisstein, N. 1970 Neural symbolic activity: A psychophysical measure. Science,  
168, 1489-1499.
- Weisstein, N. & Maguire, W. 1978 Computing the next step: Psychophysical  
measures of representation and interpretation. In A.L.Hanson & E.M.Riesman  
(Eds.) Computer vision. New York: Academic Press, Pp.243-260.
- Weisstein, N., Maguire, W., & Williams, M.C. 1982 The effects of perceived  
depth on phantoms and the phantom motion aftereffect. In Beck, J. (Ed.)  
Organization and representation in perception. Hillsdale: Lawrence Erlbaum,  
Pp.235-249.



- Weisstein, N., Montalvo, F., & Ozog, G. 1972 Differential adaptation to gratings blocked by cubes and gratings blocked by hexagons: A test of the neural symbolic activity hypothesis. *Psychonomic Science*, 27, 89-92.
- Weisstein, N. & Wong, W. 1986 Figure-ground organization and the spatial and temporal responses of the visual system. In E.C.Schwap & H.C.Nusbaum (Eds.) *Pattern Recognition by Human and Machines*, Vol.2, Visual Perception. New York: Academic Press, Pp.31-64.
- Winston, P.H. 1975 *The psychology of computer vision*. New York: McGraw-Hill. 白井良明・杉原厚吉(訳) コンピュータービジョンの心理



